



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ULB

Unsicherheit bei der Bestimmung der Schallabsorption mithilfe des Kundt'schen Rohres

Grebel, Antje
(2020)

DOI (TUprints): <https://doi.org/10.25534/tuprints-00011455>

Lizenz:



CC-BY-SA 4.0 International - Creative Commons, Attribution Share-alike

Publikationstyp: Ph.D. Thesis

Fachbereich: 16 Department of Mechanical Engineering

Quelle des Originals: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/11455>

Unsicherheit bei der Bestimmung der Schallabsorption mithilfe des Kundt'schen Rohres

Uncertainty in absorption measurement in impedance tubes

Dipl.-Ing. Antje Grebel | Dissertation | 2019

Fachgebiet Systemzuverlässigkeit, Adaptronik und Maschinenakustik SAM



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Unsicherheit bei der Bestimmung der Schallabsorption mithilfe des Kundt'schen Rohres

Am Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
eingereichte

DISSERTATION

von
Dipl.-Ing. Antje Grebel,
geb. Meister
aus Merseburg

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Tobias Melz
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Karsten Tichelmann
Tag der Einreichung:	08.10.2019
Tag der mündlichen Prüfung:	18.12.2019

Darmstadt 2019
D17

Grebel, Antje: Unsicherheit bei der Bestimmung der Schallabsorption
mithilfe des Kundt'schen Rohres
Darmstadt, Technische Universität Darmstadt,
Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUpriints: 2020
Tag der mündlichen Prüfung: 18.12.2019
URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-114559

veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0 International
<https://creativecommons.org/licenses/>

Kurzfassung

Das Kundt'sche Rohr mit zwei Mikrofonen bietet die Möglichkeit, das Spektrum des Schallabsorptionsgrades von Schaumstoffen schnell und kostengünstig zu bestimmen. Die Berechnungsmethode sowie das Vorgehen beim Messen selbst sind in der Norm DIN EN ISO 10534-2 beschrieben. Trotz Normung treten – in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern – starke Abweichungen zwischen den Messungen in berechneten Schallabsorptionsgradspektren auf. Aus der Literatur ist der Einfluss des Durchmessers auf das ermittelte Schallabsorptionsgradspektrum bekannt, wird aber kontrovers diskutiert. In Ringversuchen, d. h. Versuchen zur Bestimmung der Schallabsorption an identischen Materialien in verschiedenen Laboratorien, werden viele Effekte vermischt, weshalb sich aus diesen Untersuchungen keine eindeutigen Parameter mit Einfluss auf das Schallabsorptionsgradspektrum ableiten lassen. Daher wird an einem Polyurethanschaum der experimentelle Messprozess zur Bestimmung des Schallabsorptionsgradspektrums im Kundt'schen Rohr systematisch untersucht. Dabei werden Faktoren identifiziert, die das Ergebnis des Schallabsorptionsgradspektrums beeinflussen: der Durchmesser der Probe, die Probendicke, die Art des Einbaus und des Zuschnitts der Probe und auch die Erfahrung der Person, die die Probe zuschneidet. Zum Überprüfen aller Faktoren wurden verschiedene vollfaktorielle Versuchspläne aufgestellt. Außer der grafischen Auswertung und dem visuellen Vergleich verschiedener gemittelter Schallabsorptionsgradspektren zur Einschätzung eines Einflusses auf das Schallabsorptionsgradspektrum werden Einzahlwerte berechnet, die als Zielgrößen bei der Berechnung von Varianzanalysen verwendet werden. Aus der Bauakustik ist der α_w -Wert als Einzahlwert zur Angabe der Schallabsorption von Dämpfungselementen bekannt. Weiterhin werden außer dem arithmetischen Mittelwert der berechneten Absorptionsgrade, die klassischen Kennzahlen einer Kurvenanalyse genutzt: mittlere absolute Abweichung, Varianz, Schiefe und Wölbung. Die Varianzanalyse zeigt, ob Parameter einen Einfluss haben oder nicht. Eine anschließende Effektberechnung zeigt, wie groß der Einfluss der getesteten Parameter tatsächlich ist. Der visuelle Vergleich von Absorptionsgradspektren ermöglicht detaillierte Aussagen zu Einflüssen der Faktoren auf das Spektrum in bestimmten Frequenzbereichen. Durch die Berechnung von Einzahlwerten aus dem Spektrum des Absorptionsgrades kann mithilfe der Effektberechnung der Einfluss quantifiziert werden. Die Berechnung der Varianzanalyse zeigt, dass alle Faktoren einen signifikanten Einfluss auf den Absorptionsgrad haben – unabhängig von der gewählten Zielgröße. Die Effektberechnung hingegen zeigt, dass beispielsweise der Durchmesser und auch die Einbaurichtung keinen für die Praxis relevanten Einfluss auf den Einzahlwert des berechneten Absorptionsgrades haben, der Effekt durch den Faktor Mensch aber nicht vernachlässigbar ist. Die Ergebnisse der berechneten Absorptionsgradspektren werden mit den Berechnungen der Absorptionsgradspektren aus den Materialmodellen verglichen. Die systematische Auseinandersetzung mit den Faktoren, die den Absorptionsgrad beeinflussen, erlaubt die Beurteilung von Ergebnissen unter der gegebenen Unsicherheit.

Abstract

An impedance tube with two microphones offers the possibility of determining the sound absorption coefficient spectrum of foam materials quickly and cost-effectively. The calculation method and the measurement process itself are described in Standard DIN EN ISO 10534-2 and ASTM-E 1050-08, respectively. Despite the standardization, there are strong deviations between the calculated sound absorption coefficients obtained in measurements of the same sample. From the literature, the influence of the diameter of the sample on the determined sound absorption spectrum is known but discussed in a controversial manner. Round robin tests, i.e. tests to determine the sound absorption coefficient at identical materials in different laboratories, show, that there are different results in determines sound absorption between the labs. Various effects are mixed in that setting, which explains why no explicit parameters with influence on the sound absorption spectrum can be derived. Therefore, in that thesis, the experimental measurement process is examined at a polyurethane foam to systematically determine the sound absorption spectrum in the impedance tube. Parameters are identified that influence the result of the sound absorption spectrum: diameter of the sample, sample thickness, mounting conditions and cut of the sample, as well as the expertise of the person that cuts the sample. To verify all factors, different full-factorial designs of experiment were set up. Besides the graphic evaluation and visual comparison of different averaged sound absorption coefficient spectra for the assessment of influence of above mentioned parameters on the sound absorption coefficient spectrum, single-number values are calculated as target values to be used for the calculation of the analysis of variance. From the architectural acoustics, the α_w -value is known as a single-number value for indicating the sound absorption of an absorber. Furthermore, the classical parameters of a curve analysis are used as target value: the arithmetic mean, mean absolute deviation, variance, skewness, and kurtosis. The analysis of variance indicates whether parameters have an influence or not. A subsequent effect evaluation shows the true extent of the tested parameters' influence. The visual comparison of the absorption spectra allows detailed statements about the influences of factors on the spectrum in certain frequency ranges. By calculating single-number values from the sound absorption spectrum and using effect evaluation results, the influence of certain parameters can be quantified. The analysis of variance shows that all factors have a significant influence on absorption, independent of the chosen target value. Calculating the effects, however, shows that the diameter and even the mounting direction, for example, have no practice-relevant influence on the single-number values of the calculated absorption, even though it also shows that the effect of the human factor is not negligible. The results of the calculated absorption spectra are compared with the results of the calculated absorption coefficient spectra from material models. The thesis shows that a systematic confrontation with factors that influence the sound absorption spectrum will allow for evaluation of the results under the given uncertainty.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	II
Inhaltsverzeichnis	1
1 Einleitung	3
1.1 Motivation	4
1.2 Zielsetzung und methodisches Vorgehen	6
2 Grundlagen und Schallabsorption im Kundt'schen Rohr	10
2.1 Bestimmung des Absorptionsgrades nach DIN EN ISO 10534-1	11
2.2 Bestimmung des Absorptionsgrades nach DIN EN ISO 10534-2	13
2.3 Schallausbreitung im Rohr	14
2.3.1 Zweidimensionale Schallausbreitung.....	15
2.3.2 Dreidimensionale Schallausbreitung.....	18
2.4 Vorstellung des im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Messsystems	20
2.4.1 Grenzfrequenzen am Kundt'schen Rohr.....	22
2.5 Grundlagen der statistischen Versuchsplanung	24
2.6 Grundlagen der Varianzanalyse.....	26
2.7 Materialmodelle zur Beschreibung der Schallabsorption in Schaumstoffen	28
3 Literatur zum Thema Unsicherheit bei der Absorptionsgradbestimmung im Kundt'schen Rohr	30
3.1 Unsicherheit im Messsystem.....	30
3.2 Unsicherheit bei der Herstellung und beim Einbau der Probe	32
3.3 Materialmodelle zur Beschreibung der Absorptionseigenschaften von Schaumstoff	35
4 Charakterisierung des verwendeten Schaumstoffmaterials	38
4.1 Eingangsparameter	38
4.2 Berechnungsergebnisse von Materialmodellen	39
5 Gründe von Unsicherheit und methodisches Vorgehen	43
5.1 Identifikation von Unsicherheitsquellen.....	43
5.2 Nicht beeinflussbare Faktoren	45
5.3 Beeinflussbare und kontrollierbare Faktoren am Messsystem Kundt'schen Rohr	46
5.4 Beeinflussbare und kontrollierbare Faktoren – bei der Probenherstellung	52
5.4.1 Probenzuschnitt	52
5.4.2 Person für den Probenzuschnitt.....	54
5.4.3 Probendurchmesser.....	55
5.4.4 Montagerichtung.....	56
5.4.5 Probennummer und Messungsnummer	56
5.4.6 Zusammenfassung.....	56
5.5 Methodisches Vorgehen mithilfe der statistischen Versuchsplanung	58
5.6 Mittelungen von Absorptionsgradspektren	60
5.7 Festlegung von Zielgrößen für die Untersuchungen des Einflusses verschiedener Faktoren auf Einzahlwerte.....	61

6	Auswirkungen von Änderungen einzelner Faktoren – Ergebnisse	65
6.1	Einfluss der Faktoren auf das Absorptionsgradspektrum.....	65
6.2	Einfluss der Faktoren auf Einzahlwerte des Absorptionsgrades	75
6.2.1	Statistische Versuchsauswertung mithilfe der Varianzanalyse.....	76
6.2.2	Effektberechnung	83
6.3	Fazit.....	87
7	Validierung der Messungen an einem Messsystem eines anderen Herstellers zur Bestimmung des Schallabsorptionsgradspektrums	91
8	Zusammenfassung und Ausblick	93
A	Anhang zur Beschreibung des Messsystems	98
B	Anhang zur experimentellen Versuchsauswertung	100
C	Anhang zur statistischen Versuchsauswertung	143
D	Schallabsorber in der Bauakustik	165
D-1	Plattenresonatoren und Lochplattenresonatoren.....	165
D-2	Theorie vom homogenen Medium	166
D-3	Empirische Modelle	167
D-4	Phänomenologische Modelle	168
	Abbildungsverzeichnis	VII
	Tabellenverzeichnis	XIII
	Abkürzungsverzeichnis	XIV
	Symbolverzeichnis	XV
	Literaturverzeichnis	XVIII

1 Einleitung

Die Schallabsorption ist eine zentrale Kenngröße in der Akustik und wird in der Maschinenakustik bei der Auslegung von Kapseln wie auch in der Bauakustik zur Berechnung der Nachhallzeit von Räumen gleichermaßen benötigt. Der Schallabsorptionsgrad ist eine frequenzabhängige Größe. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Unsicherheit bei der Bestimmung des Schallabsorptionsgrades eines Schaumstoffmaterials mit dem Kundt'schen Rohr.

In der Maschinenakustik werden zur passiven Minderung des abgestrahlten Luftschalls zwei Wege beschritten: die Nutzung von Primärmaßnahmen und die Anwendung sekundärer Schallschutzmaßnahmen. Durch Primärmaßnahmen wird der durch Erregerkräfte entstehende Luft- und Körperschall direkt an der Quelle beeinflusst. Auch die Änderung des Körperschallflusses durch gezieltes Einbringen von Rippen, Sicken und Versteifungen in eine Struktur führt dazu, dass der Körperschall in weniger stark luftschallabstrahlende Bereiche geleitet werden kann. Nicht immer führen die Primärmaßnahmen zum gewünschten Erfolg, weshalb Sekundärmaßnahmen ergriffen werden. Mit Sekundärmaßnahmen wird erreicht, dass der Luft- oder Körperschall entweder gedämpft und/oder in seiner Ausbreitung gedämmt wird. Mit Dämmung wird die Schallausbreitung verhindert, durch Dämpfungsmechanismen wird Energie dissipiert. Um die Ausbreitung des abgestrahlten Luftschalls zu verhindern, werden sehr häufig Kapseln verwendet, für die beispielsweise der in dieser Arbeit untersuchte Schaumstoff eine große Rolle spielt. Die Wirkung einer Kapsel beruht auf zwei Prinzipien: der Dämmung des Luftschalls durch die äußere Kapselstruktur und der Dämpfung des Luftschalls im Inneren der Kapsel. Die Maschine selbst muss, da sie die Schallquelle darstellt, sowohl gegen die äußere Umgebung als auch gegen die Kapsel körperschallisoliert sein, damit der Körperschall weder nach außen abgeleitet noch über die körperschallerregten Kapselwände als Luftschall abgestrahlt wird [1]. Schallabsorptionsmaterialien mit einem hohen Schallabsorptionsgrad im relevanten Frequenzbereich sind für eine gute Kapselwirkung unerlässlich. Soll das Absorptionsmaterial in einer Kapsel besonders wirksam bei einer bestimmten Frequenz sein, so sollte diese durch Messungen und Berechnungen des Absorptionsgrades sicher an einem Material bestimmt werden können. Die Lage des Maximums der Schallabsorption im Spektrum wird auch durch die Materialdicke bestimmt. Mit zunehmender Materialdicke können tiefere Frequenzen absorbiert werden. Angenommen, das Maximum der Schallabsorption sollte für die Auslegung einer Kapsel bei 1060 Hz liegen und die aus Messungen berechneten Absorptionsgradspektren einiger Probenzuschnitte aus einem Schaumstoffmaterial der Dicke h_1 zeigten ein Maximum der Schallabsorption bei 900 Hz, dann ließe sich daraus der Schluss ableiten, im genannten Beispiel dünneres Material verwenden zu können, um das Maximum der Schallabsorption bei 1060 Hz zu erreichen. Allein durch eine andere Zuschnittsart einer Probe – aus dem gleichen Material mit der Dicke h_1 – wird bei den Messungen und anschließenden Berechnungen das Maximum der Schallabsorption bei 1060 Hz detektiert – eine Tatsache, die auf

Unsicherheit bei der Bestimmung des Schallabsorptionsgrades von Schaumstoffes hindeutet. Das Schallabsorptionsmaterial kann – mit Kenntnis der Unsicherheit – ausreichend dimensioniert und eine Unterdimensionierung vermieden werden.

In der Automobilbranche werden von den Herstellern Zielkurven für den Absorptionsgrad vorgegeben, die von den Zulieferern einzuhalten sind. Eine Überschreitung der Zielkurve führt zum Ausschluss des Zulieferers. Ein zuverlässiges Messverfahren ist daher für diesen Bereich besonders wesentlich. Auf Schaumstoffe aus physikalischer und chemischer Sicht sowie deren Herstellung wird im Rahmen dieser Arbeit nicht eingegangen. Hierzu sei beispielhaft auf [2] oder [3] verwiesen.

In der Bauakustik werden Materialien zur Schallabsorption vorrangig im Rahmen der Raumakustik betrachtet. Besonders zur Einstellung der Nachhallzeit von Räumen werden poröse Absorber, wie Schaumstoffe, vorzugsweise an Decken und Wandflächen befestigt. Um eine gute Sprachverständlichkeit zu gewährleisten, sollte die Nachhallzeit im Frequenzbereich von 250 Hz bis 2000 Hz gleichmäßig sein und für Klassenräume beispielsweise 0,58 Sekunden betragen [4]. Der Toleranzbereich für die Nachhallzeit liegt bei $\pm 20\%$ [4]. Am Beispiel des Klassenzimmers mit einem Volumen von 168 m^3 und einer Grundfläche von 70 m^2 ergeben sich unter Verwendung der Sabineschen Gleichung zur Berechnung der Nachhallzeit durch den Toleranzbereich Absorptionsgrade von 0,55 bis 0,85 für jedes Oktavband zwischen von 250 Hz und 2000 Hz. Mögliche Absorptionsgrade mit einer solchen Spannweite entsprechen einer Unsicherheit von 30 %. Dabei wurde angenommen, dass 70 m^2 der Raumbooberfläche, beispielsweise Teile der Raumdecke und der Wände, bedämpft werden können. Der weite Toleranzbereich der Nachhallzeit von $\pm 20\%$ lässt daher auch Messgenauigkeiten der Messungen im Kundt'schen Rohr zu, deren Abweichungen viel kleiner sind, wie diese Arbeit zeigen wird. Ein zuverlässiges Verfahren zur Bestimmung der Schallabsorption ist demnach besonders für die Erreichung von Zielwertkurven oder das gezielte Dimensionieren von Kapselmaterialien wichtig.

1.1 Motivation

Zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften von Schallabsorptionsmaterial können verschiedene Verfahren genutzt werden. Die Materialien können im Hallraum, in einer Alphakabine oder im Kundt'schen Rohr, auch Impedanzmessrohr genannt, charakterisiert werden. Die Verfahren zur Bestimmung des Absorptionsgrades im Hallraum und mit dem Kundt'schen Rohr sind zum Beispiel in der DIN EN ISO 354 „Messung der Schallabsorption in Hallräumen“ [5] beziehungsweise in der DIN EN ISO 10534-2 „Akustik – Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren – Teil 2: Verfahren mit Übertragungsfunktion“ [6] genormt.

Die Bezeichnung Kundt'sches Rohr ist in der Literatur nicht konsequent geregelt. In dem 1868 von August Kundt niedergeschriebenen und in [7] genormten Verfahren wird zur Bestimmung der

Schallabsorption nur ein Mikrofon genutzt [8]. Bei dem Messverfahren nach DIN EN ISO 10534-2 werden zwei Mikrofone verwendet, weshalb das Verfahren auch als 2-Mikrofonverfahren bekannt ist [9]. Mit beiden Verfahren ist die Bestimmung der Impedanz möglich, worauf schon im Titel der Normen hingewiesen wird. MÖSER [10] hingegen leitet die mathematischen Grundlagen des in der Norm vorgestellten Messprinzips im Buch „Technische Akustik“ unter dem Kapitel „Messungen im Kundt’schen Rohr“ her. In dieser Dissertation, in der ausschließlich das 2-Mikrofonverfahren eingesetzt wird, wird der Begriff Kundt’sches Rohr verwendet.

Durch Normung des Messverfahrens sollte es bei dessen Anwendung keine offenen Fragen geben, weswegen es zunächst erstaunen mag, dass sich diese Arbeit mit der Messung von Absorptionsgraden mit dem Kundt’schen Rohr beschäftigt. Im Rahmen von Untersuchungen am Fachgebiet Systemzuverlässigkeit, Adaptronik und Maschinenakustik SAM an der TU Darmstadt wurde festgestellt, dass trotz exakt nach Norm durchgeführten Messungen die Ergebnisse der Absorptionsgradbestimmung schwanken. Da auch nach einer systematischen Fehlersuche weiterhin erhebliche Schwankungen auftraten, lag die Vermutung nahe, dass es noch weitere unbekannte Unsicherheitsfaktoren in dem genormten Verfahren gibt. Diese werden in der vorliegenden Dissertation untersucht.

Der Begriff **Unsicherheit** umfasst in dieser Arbeit daher primär die Einflussgrößen, die einen Effekt auf den Absorptionsgrad haben. Sekundär wird darunter auch die Größe des Einflusses verstanden.

Für eine Absorptionsgradbestimmung muss eine Probe aus dem entsprechenden Material gefertigt und in das Kundt’sche Rohr eingebracht werden. Nicht nur die Probengröße – die auch in der Literatur kontrovers diskutiert wird (vergleiche Kapitel 3) – ist ein Faktor mit einem Einfluss auf den gemessenen Absorptionsgrad, sondern auch die genaue Art des Einbaus und die durch den Zuschnitt bedingte Rundheitsabweichung sind Faktoren, die das Messergebnis des Schalldrucks und damit den berechneten Absorptionsgrad beeinflussen. Werden auf unterschiedliche Weise gefertigte Proben im Kundt’schen Rohr eingesetzt und aus den gemessenen Schalldrücken der Absorptionsgrad berechnet, können sich die Absorptionsgrade voneinander unterscheiden. Gleiches gilt auch bei Änderungen der Probengröße, der Art des Einbaus und anderen Faktoren.

Eine detaillierte kritische Auseinandersetzung mit dem Messverfahren gibt es in der Literatur bisher nicht. In dieser Dissertation wird der Messprozess mit dem Kundt’schen Rohr systematisch untersucht und dabei werden Faktoren mit einem Einfluss auf den Absorptionsgrad identifiziert. Die Arbeit soll vor allem dafür sensibilisieren, Abweichungen im Frequenzbereich zwischen Messwerten zu erkennen und sich derer während der Messungen, bei der Interpretation berechneter Absorptionswerte und insbesondere bei der konstruktiven Arbeit damit bewusst zu sein. Das Ziel ist es daher, mögliche Faktoren mit Einfluss auf den Absorptionsgrad zu erfassen und deren Einfluss quantifizieren zu können.

1.2 Zielsetzung und methodisches Vorgehen

Das 2-Mikrofonverfahren zur Bestimmung des Schallabsorptionsgrades kann problemlos auf die Weise angewendet werden, die in der aktuell gültigen Fassung der Norm beschrieben ist – vorausgesetzt, dass es innerhalb einer Nutzergruppe, beispielsweise innerhalb eines Unternehmens oder einer Forschungseinrichtung, immer gleich und bestenfalls von derselben Person angewendet wird. Die Abweichungen einzelner Mess- und Berechnungsergebnisse innerhalb einer Institution sind, wie auch in der Arbeit gezeigt wird, gering. Von verschiedenen Institutionen durchgeführte Reihenuntersuchungen [11, 12] zeigen jedoch, dass es trotz Normung und vorliegenden Veröffentlichungen Forschungsbedarf zur Unsicherheit der Messungen gibt. Die Messungen im Rahmen dieser Reihenuntersuchungen wurden an mehreren Orten und mit unterschiedlichen Messtechniken durchgeführt. HOROSHENKOV ET AL. [11] stellen im Jahr 2007 eine Studie vor, aus der eindeutig hervorgeht, dass die von sieben Projektpartnern bestimmten Absorptionsgrade sich zum Teil erheblich voneinander unterscheiden. HOROSHENKOV ET AL. kritisieren, dass die Art, auf die eine Probe zugeschnitten werden soll, in den Normen keine Beachtung findet, und führen die Unterschiede zwischen den Ergebnissen auf die verschiedenen Zuschnittsmöglichkeiten zurück. Die in der Untersuchung verwendeten Kundt'schen Rohre sind von unterschiedlichen Herstellern und haben verschiedene Durchmesser, Rohrlängen und Mikrofonabstände. Es besteht derzeit keine Möglichkeit, einen konkreten Messaufbau zu validieren, da kein standardisiertes Material existiert, für das die Absorptionseigenschaften hinreichend bekannt sind [13].

Zur Berechnung der Grenzfrequenzen sind diverse Gleichungen in der Literatur bekannt. Dennoch stellt die Grenzfrequenz eine Unsicherheit dar, da die Angaben zur Berechnung voneinander abweichen. Die daraus resultierende Unsicherheit wird in der Dissertation diskutiert.

Die Messunsicherheit durch verschiedene Einbausituationen der Proben in die Kundt'schen Rohre verschiedener Messinstitutionen wird von POMPOLI ET AL. [14] untersucht. Dabei werden Kundt'sche Rohre gleichen Durchmessers, aber von unterschiedlichen Herstellern verwendet. POMPOLI ET AL. zeigen, dass es bedingt durch das Messsystem durchaus zu Streuungen der berechneten Absorptionsgrade kommen kann, und quantifizieren diese. Das Problem der daraus resultierenden Messunsicherheit ist nicht nur bei Messungen mit dem Kundt'schen Rohr bekannt. Ähnliche Versuche im Rahmen eines Ringversuchs zur Vergleichbarkeit von Messungen nach DIN EN ISO 354 wurden bereits 2010 von ANDERSSON ET AL. [15] angekündigt.

Im Anhang zur DIN EN ISO 10534 [6] wird auf systematische und zufällige Fehler eingegangen. Diese werden allerdings in der Messkette und beim Aufbau des Rohres verortet und nicht beim eigentlichen Einbau der Probe in das Rohr. Auch in weiteren Beiträgen in der Literatur zum Thema Messungen im Kundt'schen Rohr werden kaum Fehlerbetrachtungen durchgeführt. Systematische und zufällige Messfehler bei Transmissionsmessungen werden 1977 von PARROT ET AL. [16] an drei

Materialien dokumentiert. Ihr Fazit, es würde keine Probleme bei den Messungen geben, gründet auf Untersuchungen von Absorptionsmaterialien mit einer starren Matrixstruktur, die nicht durch Luftschall zu Schwingungen angeregt wird. BIES und DAVIES [17] führen ebenfalls eine Reihenuntersuchung zu Transmissionsmessungen durch und schließen dieser eine ausführliche Fehlerbetrachtung an. Hier dargestellte Literatur stellt nur einen kleinen Teil der relevanten Literatur zum Thema Unsicherheit am Kundt'schen Rohr dar. Ein ausführlicher Literaturüberblick findet sich in Kapitel 3.

Offenbar gibt es also – trotz Normung – Hinweise in der Literatur, dass Messungen mit anschließend berechneten Absorptionsgraden an verschiedenen Institutionen oder mit verschiedenen Messsystemen nicht miteinander vergleichbar sind. Über die Ursachen für die Abweichungen zwischen den sich unterscheidenden Ergebnissen bei der Berechnung des Absorptionsgrades werden in der bisherigen Literatur nur Vermutungen geäußert.

Daraus leiten sich die **Forschungsfragen** dieser Arbeit ab:

Welche Faktoren im Fertigungsprozess der Probe und im Messprozess selbst haben einen Einfluss auf den aus Messungen im Kundt'schen Rohr berechneten Absorptionsgrad? Wie lässt sich ihr Einfluss quantifizieren und mit Methoden der Statistik bestätigen und möglicherweise bei der Dimensionierung von Schaumstoffproben nutzen, um Unsicherheit zu reduzieren?

In der vorliegenden Arbeit wird daher eine Methode vorgestellt, mit der Parameter mit Einfluss auf den gemessenen Absorptionsgrad identifiziert und quantifiziert werden unter Verwendung **eines** Messsystems und **eines** Polyurethanschaum, um die bisher nicht geklärte Unsicherheit bei der Bestimmung des Absorptionsgrades beherrschbar zu machen. Damit stellt diese Arbeit eine umfassende Untersuchung der Faktoren mit Einfluss auf den Schallabsorptionsgrad eines Schaumstoffes innerhalb **einer** Institution an einem Messsystem dar. Sind die möglichen Faktoren mit Einfluss auf den Absorptionsgrad identifiziert und die Höhe des Einflusses quantifiziert, können berechnete Absorptionsgrade aus verschiedenen Institutionen mit diesen Erkenntnissen besser miteinander verglichen werden.

Zur Beantwortung der Forschungsfragen werden zwei unterschiedliche Betrachtungsweisen verfolgt:

1. visueller Vergleich verschiedener Absorptionsgradspektren und
2. statistische Auswertung von aus Absorptionsgradspektren berechneten Einzahlwerten.

Absorptionsgradspektren werden auch in der Reihenuntersuchung von [11] visuell miteinander verglichen. Während dort einzelne berechnete Absorptionsgradspektren visuell miteinander verglichen werden, werden in der vorliegenden Dissertation gemittelte Absorptionsgradspektren miteinander verglichen. Um den Einfluss einzelner Faktoren auf den Absorptionsgrad zu ermitteln, werden unterschiedliche Mittelungen der Messdaten durchgeführt und ausgewertet. Um beispielsweise den Einfluss des Faktors Zuschnitt auf den Absorptionsgrad darzustellen, werden die jeweiligen Messungen

der zu vergleichenden Zuschnittsverfahren gemittelt und die gemittelten Absorptionsgrade visuell miteinander verglichen. Die messtechnischen Untersuchungen in dieser Arbeit folgen den Standards der statistischen Versuchsplanung, um systematische Einflüsse auszuschließen. Durch den visuellen Vergleich der berechneten Kurven des Absorptionsgrades sollen detaillierte, auf einzelne Frequenzbereiche bezogene Aussagen getroffen werden.

Außerdem wird in dieser Dissertation der Einfluss von Faktoren auf Einzahlwerte bestimmt. Die Varianzanalyse erlaubt Rückschlüsse auf die Signifikanz eines Faktors. Zur Berechnung einer Varianzanalyse müssen die frequenzabhängig vorliegenden Absorptionsgrade (Absorptionsgradspektren) auf einen Einzahlwert, die sogenannte Zielgröße, reduziert werden, der für den gesamten betrachteten Frequenzbereich Gültigkeit besitzt. Eine bekannte Größe zur Reduktion des frequenzabhängigen Absorptionsgrades auf einen Einzahlwert ist der bewertete Schallabsorptionsgrad α_w . Auf diese Größe wird im Rahmen der Auswertung besonders geachtet, weil Hersteller die Schallabsorption von Bauteilen mit ihr kennzeichnen. Trotzdem werden Varianzanalysen auch für weitere Einzahlwerte gewählt und berechnet, um das Vorgehen zu verifizieren. Ziel dieser Arbeit ist es herauszufinden, ob anhand der Einzahlwerte ebenfalls diejenigen Faktoren mit einem Einfluss auf den berechneten Absorptionsgrad identifiziert werden können. Außerdem ist es ein Ziel, diesen Einfluss zu quantifizieren. Mithilfe einer Effektberechnung werden mathematisch signifikante Effekte berechnet und danach hinsichtlich praktischer Relevanz überprüft.

Um die Qualität von Messergebnissen beurteilen zu können, stehen in der Literatur verschiedene Materialmodelle von Schaumstoffen zur Verfügung. Diese Materialmodelle erfordern als Eingangsparmeter charakteristische Schaumstoff-Materialparameter, teilweise auch Umgebungsparameter. Der Vergleich von berechneten Absorptionsgraden aus Materialmodellen und Messungen ist gut geeignet, um Messergebnisse validieren zu können, da mit den Materialmodellen der Schallabsorptionsgrad unabhängig von Zuschnitts- und Einbaubedingungen berechnet wird.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich wie folgt: In Kapitel 2 werden zuerst die verschiedenen Möglichkeiten erklärt, wie in Kundt'schen Rohren die Schallabsorption bestimmt werden kann, bevor die technischen und mathematischen Grundlagen der Schallabsorption im Kundt'schen Rohr mit dem Ziel der Herleitung der Grenzfrequenzen des Messsystems vorgestellt werden. Unsicherheit, resultierend aus den unterschiedlichen Angaben zur Berechnung der Grenzfrequenzen, wird diskutiert. Außerdem werden die Grundlagen der verwendeten statistischen Verfahren sowie der verwendeten Materialmodelle erläutert. In Kapitel 3 wird ein Überblick über bestehende Forschungsergebnisse zur Messunsicherheit im Kundt'schen Rohr gegeben. Zudem wird der Stand der Forschung zu den Materialmodellen skizziert. Der verwendete Schaumstoff und erste Ergebnisse – der Vergleich der Ergebnisse der aus den Messdaten berechneten Absorptionsgradspektren mit den Ergebnissen der Berechnungen aus den Materialmodellen – werden in Kapitel 4 vorgestellt. Im Kapitel 5 werden die Gründe

der Unsicherheit untersucht – etwas, was in der Literatur bisher nicht geschehen ist. Es werden Versuchspläne erarbeitet und Zielgrößen für die Einzahlberechnung aus Absorptionsgradspektren vorgestellt. Die Ergebnisdiskussion findet in Kapitel 6 statt. Dabei werden aufgestellte Thesen verifiziert oder falsifiziert, aufgeteilt in die Auswertungen von gemittelten Absorptionsgradspektren und die Auswertung von Einzahlwerten. In Kapitel 7 wird eine zweite Möglichkeit der Datenvalidierung vorgestellt: Messungen des gleichen Schaumstoffes an einem anderen Messsystem. Die Ergebnisse bestätigen die Erkenntnisse aus der Literatur und zeigen die Notwendigkeit der Forschung in dem Gebiet der Unsicherheit bei Messungen zur Bestimmung der Schallabsorption im Kundt'schen Rohr. Abschließend werden in Kapitel 8 eine Zusammenfassung der Ergebnisse und ein Ausblick auf zukünftige Forschungsgebiete gegeben.

2 Grundlagen und Schallabsorption im Kundt'schen Rohr

Grundsätzlich ist die Bestimmung des akustischen Verlustfaktors von Absorptionsmaterialien im Kundt'schen Rohr im europäischen Raum in den Normen

- DIN EN ISO 10534-1 „Akustik – Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren – Teil 1: Verfahren mit Stehwellenverhältnis (ISO 10534-1:1996)“ [7] und
- DIN EN ISO 10534-2 „Akustik – Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren – Teil 2: Verfahren mit Übertragungsfunktion (ISO 10534-2:1998)“ [6]

beschrieben. Für die USA sind die zwei entsprechenden Normen

- ASTM C 384-04 „Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials by impedance tube method“ [18] sowie
- ASTM E 1050-08 „Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones and a digital frequency analysis system“ [19]

verbindlich. Deren Anwendung außerhalb der USA ist freiwillig; Anforderungen an das Vorgehen beim Messen sind nicht präziser formuliert.

Ein Kundt'sches Rohr ist ein von der Umgebung schwingungsentkoppelt aufgestelltes Messrohr zur Bestimmung des akustischen Absorptionsgrades einer Materialprobe. Dabei ist der Querschnitt des Rohres frei wählbar. Für Rohre mit quadratischem oder kreisrundem Querschnitt kann die Schallausbreitung analytisch relativ leicht beschrieben werden, wie beispielsweise in [10] und in Abschnitt 2.3 gezeigt. Andere Querschnittsformen werden in der Literatur nicht diskutiert. Die Anregung der an einem Rohrende vor einem schallharten Abschluss eingebrachten Probe erfolgt mit einem Lautsprecher, der im Rohr ein akustisches Feld erzeugt.

Die auftreffende Schalleistung wird am starren Rohrende reflektiert und durch den porösen Absorber durch Mikrobewegungen im Absorptionsmaterial teilweise in Wärme umgewandelt. Ein Teil der Schallenergie wird auch transmittiert. Der Absorptionsgrad α ist eine dimensionslose Größe, die den Anteil der nicht reflektierten und nicht transmittierten Leistung an der gesamten Leistung angibt. Er bezeichnet das Verhältnis von absorbiertem zu auftreffender Schalleistung und ist vom Schalleinfallswinkel abhängig.

Reale Messumgebungen und Anwendungsbereiche von Absorptionsmaterialien sind gekennzeichnet von diversen Schallquellen und oftmals einer reflexionsbehafteten Umgebung, sodass von einem diffusen Schallfeld auszugehen ist. Absorptionsmessungen für Absorber, deren Absorptionsvermögen richtungsabhängig ist und bei denen Resonanzerscheinungen genutzt werden, wie beispielsweise Lochplatten- und Schlitzabsorber, oder Absorber, die in einem diffusen Schallfeld platziert werden,

sollten im diffusen Schallfeld einer Alphakabine oder eines Hallraumes durchgeführt werden. Bei beiden Verfahren wird ein Teil des Bodens mit dem schallabsorbierenden Material bedeckt und der Absorptionsgrad aus der Nachhallzeit des leeren Raumes – verglichen mit der Nachhallzeit des Raumes mit Materialproben – berechnet. Die Alphakabine wird von der Industrie gern genutzt [20]. Sie ist mit $6,44 \text{ m}^3$ Volumen ein verkleinerter Hallraum, in dem mit Probengrößen zwischen $0,6 \text{ m}^2$ und $2,4 \text{ m}^2$ gearbeitet werden kann. Ein Hallraum hingegen hat ein Volumen von mindestens 200 m^3 und erfordert Proben von 10 m^2 bis 12 m^2 [21]. Beide Verfahren haben dadurch den Nachteil, dass mehr Material benötigt wird, um den Absorptionsgrad zu bestimmen, was mit höheren Kosten verbunden ist.

Ein im Kundt'schen Rohr bestimmter Absorptionsgrad kann nicht direkt mit Ergebnissen von Messungen aus anderen Verfahren verglichen werden. Im Kundt'schen Rohr fällt der Schall senkrecht auf die Materialprobe; ein diffuser Schalleinfall wie in der Alphakabine und dem Hallraum kann nicht stattfinden. Der andere Grund, weshalb die Messergebnisse nicht vergleichbar sind, ist die verwendete Probengröße. Besonders für Probenkörper aus Glasfasermaterial weisen SONG ET AL. [22] darauf hin, dass speziell im niederfrequenten Bereich Messungen mit einiger Vorsicht zu betrachten sind. Der bedeutende Vorteil der Verfahren im Kundt'schen Rohr besteht darin, dass nur sehr kleine Materialproben mit einer Größe von maximal $0,09 \text{ m}^2$ benötigt werden [1]. Die Angabe berechnet sich aus der Annahme, ein Rohr mit einem quadratischen Querschnitt und einer Kantenlänge von $0,3 \text{ m}$ zu verwenden.

2.1 Bestimmung des Absorptionsgrades nach DIN EN ISO 10534-1

Für bauakustische Vorhaben wird der Absorptionsgrad nur terz- oder sogar oktavweise gefordert und angegeben, weshalb die Probe monofrequent bei den entsprechenden Terz- oder Oktavmittenfrequenzen über einen Lausprecher angeregt wird. Durch die monofrequente Anregungsfrequenz bildet sich ein stabiles Stehwellenfeld aus, dessen Schalldruckminima und -maxima mit einem entlang der Rohrlängsachse verschiebbaren Mikrofon detektiert werden [7, 18]. Abbildung 1 zeigt den prinzipiellen Messaufbau zur Ermittlung des Absorptionsgrades nach DIN EN ISO 10534-1 aus Schalldruckmessungen.

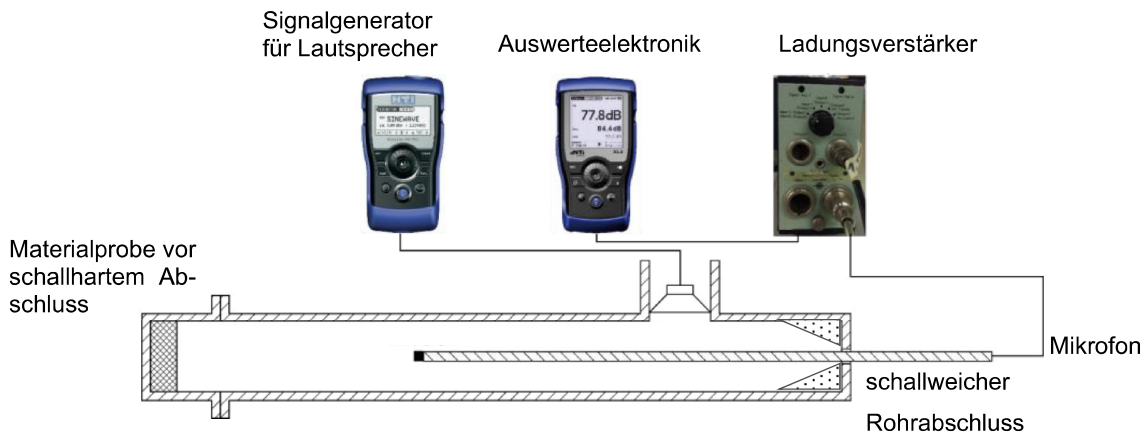


Abbildung 1: Messsystem zur Bestimmung des Schallabsorptionsgrades nach DIN EN ISO 10534-1

Aus dem Verhältnis des Schalldruckmaximums p_{\max} zum Schalldruckminimum p_{\min} lassen sich der Reflexionsfaktor r (Gleichung(2.1)), und daraus der Absorptionsgrad α (Gleichung(2.2)), berechnen.

$$|r| = \frac{\frac{|p_{\max}|}{|p_{\min}|} - 1}{\frac{|p_{\max}|}{|p_{\min}|} + 1} \quad (2.1)$$

$$\alpha = 1 - r^2 \quad (2.2)$$

Abbildung 2 zeigt exemplarisch die Schalldruckverteilung im Rohr bei einer sinusförmigen Anregung. Vor der Wand ist der Schalldruck maximal, da sich die Amplituden der hin- und rücklaufenden Welle addieren. Ein festes Rohrende führt immer zu einem Phasensprung um π zwischen hin- und rücklaufender Welle. In Abbildung 2 ist der Phasenunterschied indirekt durch den eingezeichneten zeitlichen Versatz der hin- und rücklaufenden Welle dargestellt.

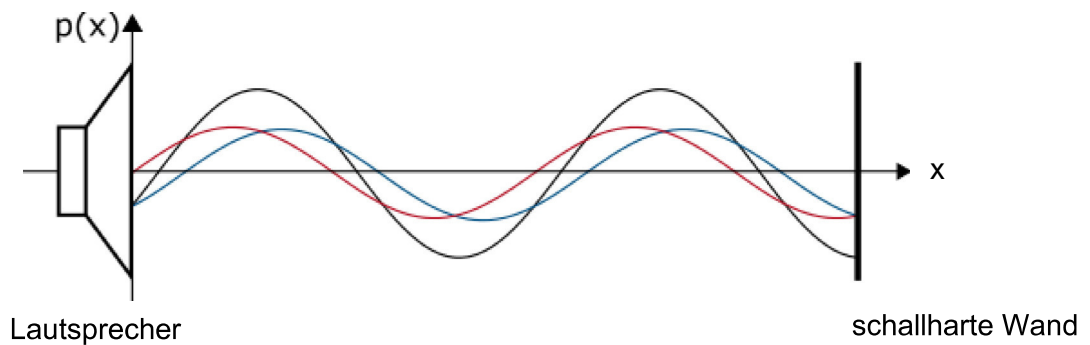


Abbildung 2: Schalldruck von einfallender (rot), reflektierter (blau) und resultierender (schwarz) Welle bei Reflexion an einer schallharten Wand

Der Vorteil dieses Verfahrens ist der geringe Messtechnikbedarf. Es ist allerdings sehr zeitaufwändig, da der Absorptionsgrad frequenzselektiv bestimmt wird. Weitere Ausführungen zur Bestimmung des Schallabsorptionsgrades nach DIN EN ISO 10534-1 finden sich in [10].

2.2 Bestimmung des Absorptionsgrades nach DIN EN ISO 10534-2

Durch eine breitbandige Anregung kann der Absorptionsgrad mit dem sogenannten 2-Mikrofonverfahren schnell und für alle angeregten Frequenzen im Gültigkeitsbereich des Rohres bestimmt werden. Das für diese Arbeit hauptsächlich verwendete Kundt'sche Rohr wird in Abbildung 3 skizziert. Die Skizze zeigt links den Lautsprecher zur Abstrahlung des Anregungssignals, erzeugt durch den Rauschgenerator. Das rechte Rohrende ist der schallharte Rohrabschluss, vor dem eine Materialprobe eingezeichnet wurde (schraffierte Fläche).

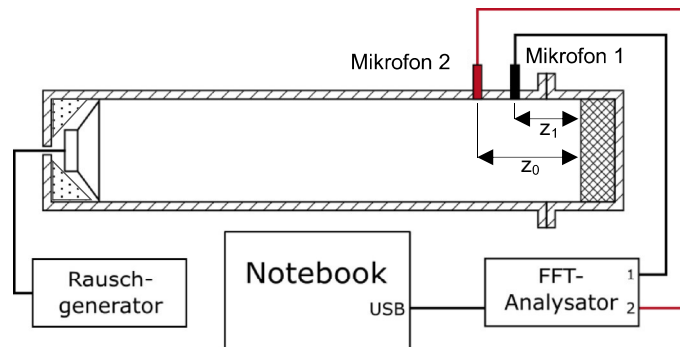


Abbildung 3: Messaufbau zur Bestimmung des Schallabsorptionsgrades nach DIN EN ISO 10534-2 [6]

Im Kundt'schen Rohr befinden sich zwei Mikrofone mit einem bekannten und festgelegten Abstand an den Orten z_1 und z_0 . Aus der Übertragungsfunktion zwischen den damit gemessenen Schalldrücken kann der Reflexionsfaktor und damit auch der Absorptionsgrad berechnet werden. Die gemessenen Schalldrücke p_1 und p_2 an beiden Mikrofonen setzen sich aus der einfallenden, das heißt vom Lautsprecher ausgesendeten, Schallwelle und der an der Oberfläche des Schaumstoffes reflektierten Schallwelle zusammen. Die einfallenden und reflektierten Schallwellen werden mithilfe der Wellenzahl ($k = \omega/c_0$), berechnet aus der Kreisfrequenz ω und der Schallgeschwindigkeit c_0 , sowie z_1 und z_0 , den Abständen der Mikrofone von der Oberfläche des schallabsorbierenden Materials beschrieben. Der Reflexionsfaktor ist mit r gekennzeichnet

$$\begin{aligned}
 p_1(k) &= \overbrace{e^{jkz_1} * p_v}^{\text{einfallend}} + \overbrace{e^{-jkz_1} * p_z}^{\text{reflektiert}} \\
 p_2(k) &= e^{jkz_0} * p_v + e^{-jkz_0} * p_z = e^{jk(z_1+\Delta z)} * p_v + e^{-jk(z_1+\Delta z)} * p_z.
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Da aus den gemessenen Schalldrücken die Schalldruckamplituden der einfallenden und der reflektierten Welle bestimmt werden, heißt dieses Verfahren auch „Prinzip der Wellentrennung“. Aus dem

Quotienten der beiden gemessenen Schalldrücke lässt sich der Reflexionsfaktor bestimmen. Die Mikrofonpositionen x_1 und x_2 sind festgelegt und ändern sich während der Messung der Schalldrücke nicht. Die Differenz der beiden Abstände wird mit Δz bezeichnet. Die Übertragungsfunktion zwischen den beiden Schalldrücken wird mit H_{12} bezeichnet.

$$r(k) = \frac{p_z(k)}{p_v(k)} = e^{j2kz_1} * \frac{e^{jk*\Delta z} * p_{M1} - p_{M2}}{p_{M2} - e^{-jk*\Delta z} * p_{M1}} \quad (2.4)$$

$$r(k) = e^{j2kz_1} * \frac{e^{jk*\Delta z} - H_{12}}{H_{12} - e^{-jk*\Delta z}} \quad (2.5)$$

In Anhang A finden sich alle zur Berechnung notwendigen Zwischenschritte. Durch eine FFT-Analyse an beiden Positionen und die Berechnung der Übertragungsfunktion kann neben dem komplexen Reflexionsfaktor r und dem Absorptionsgrad α auch die komplexe Eingangsimpedanz Z_1 des Probenmaterials bestimmt werden [6, 19], weil die Impedanz der Luft Z_0 bekannt ist.

$$Z_1 = Z_0 \frac{1+r}{1-r} \quad \text{und} \quad r = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \quad (2.6)$$

$$\alpha = 1 - |r|^2$$

Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in der schnellen Messdurchführung. Durch die Komplexität der Berechnung und den hohen Messtechnikeinsatz geht jedoch ein Teil der Transparenz und Einfachheit des Verfahrens verloren. Dies zeigt sich beispielsweise bei den in Abschnitt 7 vorgestellten Messungen an einem Messsystem eines anderen Herstellers (nicht an der TU Darmstadt), bei dem der theoretisch mögliche Frequenzbereich des Kundt'schen Rohres durch Signalfilter verkleinert wird, worauf aber in der Software nicht hingewiesen wird.¹ Für mehr Informationen zur generellen Funktionsweise des Verfahrens mit Übertragungsfunktion wird auf [6, 13, 19, 21] verwiesen.

2.3 Schallausbreitung im Rohr

Während sich in Festkörpern Longitudinal- und Transversalwellen ausbreiten können, ist in Gasen ausschließlich die Ausbreitung von Longitudinalwellen möglich. Die Schallausbreitung kann mithilfe der Schallschnelle und des Schalldrucks charakterisiert werden.

Der einfachste Fall der Schallausbreitung ist der senkrechte Schalleinfall einer ebenen Welle auf eine Materialprobe. In Rohren ist eine ebene Schallausbreitung möglich, wenn der Rohrdurchmesser im Vergleich zur Wellenlänge klein ist. Sobald der Rohrdurchmesser etwa einer halben Wellenlänge der

¹ mündliche Information von Herrn Briele, Brüel & Kjær am 20.10.2016.

zugehörigen Frequenz entspricht, bilden sich im Rohr Quermoden aus. Diese Modenbildung wird im Folgenden hergeleitet. Die erste auftretende Quermode im Rohr grenzt den Messbereich zu höheren Frequenzen ab, da oberhalb der zugehörigen Frequenz keine ebene Wellenausbreitung mehr stattfinden kann. Bis zur Grenzfrequenz (siehe Gleichung (2.19)) liegt eine ebene Wellenausbreitung vor, weil der Schall gezwungen wird, sich entlang der Rohrlängsachse auszubreiten [10].

Überlagern sich zwei gegenläufige Wellen gleicher Frequenz und Amplitude, wird von einer stehenden Welle gesprochen. Die Auslenkung ist an den Knotenpunkten Null. Bei stehenden Wellen beträgt der Phasenunterschied zwischen Schalldruck und Schallschnelle $\pi/2$. An der die Schallwelle reflektierenden Wand ist die Schallschnelle Null, der Schalldruck maximal. Demnach ist das Maximum der Schallschnelle im Abstand von $\lambda/4$ vor der Wand zu erwarten. Ein Maximum der Schallschnelle bedeutet auch, dass die kinetische Energie maximal ist. Aus diesem Grund wird die maximale Schallabsorption der Frequenzen erreicht, bei der $\lambda/4$ der Materialdicke h des Absorbers entspricht.

2.3.1 Zweidimensionale Schallausbreitung

Zum Verständnis der sich möglicherweise in einem Rohr ausbildenden Moden ist eine zweidimensionale Betrachtung der Schallausbreitung im Rohr sinnvoll. Die folgenden Herleitungen sind an jene in Möser's Werk „Technische Akustik“ [10] angelehnt. Zunächst wird die Schallausbreitung zwischen zwei reflektierenden Platten betrachtet. In Abbildung 4 ist das schematisch dargestellt. Der Schall breitet sich diffus zwischen den zwei Platten aus und wird dabei oft an ihnen reflektiert. Der sich im Rohr ausbildende Gesamtschalldruck p setzt sich zusammen aus der Schallausbreitung in x- und der Schallausbreitung in y-Richtung. Der Reflexionsfaktor r wird eingeführt, um die Reflexion an einer Wand, hier der oberen Platte, zu beschreiben. Er wird aus dem Amplitudenverhältnis der Schallwellen berechnet und ist somit eine Feldgröße und ebenfalls eine dimensionslose Kenngröße. Die Platten haben die Länge x und stellen das zweidimensionale Rohr dar. Die Rohrwandungen liegen bei $y = 0$ und $y = d$, wobei d dem Durchmesser des zweidimensionalen Rohres entspricht. Kennzeichnend für die Schallausbreitung sind die Wellenzahlen k_x und k_y , die die Anzahl n der auf die Länge l entfallenden Wellenlängen angeben. Bei der zweidimensionalen Betrachtung des Rohres entspricht l in x-Richtung der Länge der Platten, zwischen denen sich der Schall ausbreitet, und in y-Richtung dem Abstand d der beiden Platten.

$$p = p_0 e^{-ik_x x} (e^{-ik_y y} + r e^{ik_y y}) \quad (2.7)$$

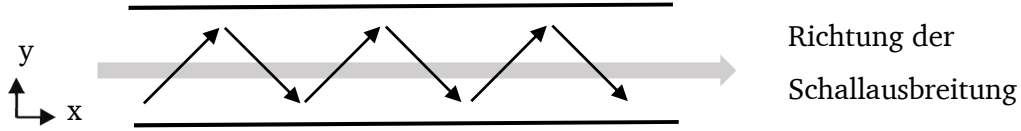


Abbildung 4: zweidimensionale Schallausbreitung zwischen zwei reflektierenden Platten (schematisch)

Im Allgemeinen wird, wenn ein komplettes Schallfeld betrachtet wird und die Anteile der Wellen aus x- oder y-Richtung nicht mehr getrennt werden können oder müssen, nur die Wellenzahl k verwendet. Sie setzt sich wie folgt zusammen: $k^2 = k_x^2 + k_y^2$. Die Gleichung zur Berechnung der Wellenzahl lautet

$$k = \frac{\omega}{c_0} = \frac{2\pi f}{c_0} = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{n\pi}{l}. \quad (2.8)$$

Für die Schallausbreitung im zweidimensionalen Rohr, in Abbildung 5 durch die zwei Platten dargestellt, sind die Wellenzahlen k_x und k_y unbekannt, können jedoch mithilfe der Randbedingungen bestimmt werden. Dazu wird die Wellengleichung gelöst. Das Rohr wird als unendlich lang betrachtet, um Reflexionen an möglichen Enden auszuschließen. Aus der allgemeinen Wellengleichung folgt, dass durch Ableitung des örtlichen Schalldrucks die Schallschnelle berechnet werden kann. Näheres hierzu findet sich in den Grundlagenkapiteln in [21]. Die Schnelle muss an den Rohrwänden ($y = 0$ und $y = d$) zu Null werden.

$$\frac{\partial p}{\partial y}|_{y=0} = \frac{\partial p}{\partial y}|_{y=d} = 0 \quad (2.9)$$

Damit gilt (siehe Gleichung (2.7)):

$$\frac{\partial p}{\partial y}|_{y=0} = p_0 e^{-ik_x x} (-ik_y e^{-ik_y y} + r i k_y e^{ik_y y}) = 0. \quad (2.10)$$

Durch die Randbedingung $y = 0$ ergibt sich $r = 1$, da die komplette Schallenergie an der Rohrwandung reflektiert wird. Damit kann Gleichung (2.7) auch in folgender Form ausgedrückt werden:

$$\begin{aligned} p &= p_0 e^{-ik_x x} (e^{-ik_y y} + r e^{ik_y y}) \\ &= p_0 e^{-ik_x x} (\cos(k_y y) - i \sin(k_y y) + \cos(k_y y) + i \sin(k_y y)) \\ &= p_0 e^{-ik_x x} 2 \cos k_y y. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Die zweite Randbedingung $y = d$ liefert, unter Verwendung der obigen, nun vereinfachten, Form:

$$\frac{\partial p}{\partial y}|_{y=d} = 2p_0 e^{-ik_x x} (-1) \sin(k_y y) = 0 \quad (2.12)$$

Die Quermoden im Rohr lassen sich durch die Lösung von (2.12) $\sin(k_y d) = 0$, bekannt als Eigenwertgleichung, berechnen. Die Sinusfunktion hat Nullstellen bei π und Vielfachen davon. Daraus ergeben sich die Lösungen der Eigenwertgleichung und damit die Wellenzahl k_y . Die so berechneten Eigenwerte sind ein Maß für die Verteilung der Quermoden im Rohr.

$$k_y = \frac{n\pi}{d}; \quad n = 1, 2, \dots \quad (2.13)$$

Der Verlauf des Schalldrucks in radialer Richtung $f_n(y)$ im Rohr lässt sich mithilfe von Gleichung (2.14) beschreiben.

$$f_n(y) = \cos k_y y = \cos\left(\frac{n\pi y}{d}\right) \quad (2.14)$$

Die allgemeine Gleichung zur Schalldruckverteilung im Rohr lässt sich zusammenfassen aus (2.10), (2.13) und (2.14) in der Gleichung

$$p = \sum_{n=0}^{\infty} p_n e^{-ik_x x} \cos\left(\frac{n\pi y}{d}\right). \quad (2.15)$$

Durch die Schallausbreitung in axialer Richtung sind theoretisch, bei einem Rohr mit einer definierten Länge x , auch Moden in x -Richtung möglich. Zur Berechnung wird die allgemeine zweidimensionale Wellengleichung genutzt:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + k^2 p = 0. \quad (2.16)$$

In obiger Gleichung beinhaltet k die Wellenanteile aus x - und y -Richtung. Die Wellenzahl in y -Richtung ist bekannt (siehe Gleichung (2.13)).

$$k_x^2 = k^2 - \left(\frac{n\pi}{d}\right)^2 \quad (2.17)$$

Eine Schallausbreitung zur Quelle hin ist unmöglich, ebenso wie ein Anstieg des Schalldrucks mit zunehmendem Abstand von der Quelle. Die Lösung von k_x , dargestellt in Gleichung (2.18), kann daher unter den Wurzeln ausschließlich positive Werte annehmen. Es ergeben sich zwei Möglichkeiten:

$$k_x = \begin{cases} +\sqrt{k^2 - \left(\frac{n\pi}{d}\right)^2} & ; |k| > \frac{n\pi}{d}, \\ -i\sqrt{\left(\frac{n\pi}{d}\right)^2 - k^2} & ; |k| < \frac{n\pi}{d} \end{cases}. \quad (2.18)$$

Zunächst wird für eine beliebige Frequenz die allgemeine Wellenzahl $k = \omega/c_0$ berechnet und mit der Wellenzahl k_y verglichen. Ergibt sich nach der Berechnung von k_x eine imaginäre Wellenzahl, bedeutet dies, dass sich die Mode bei dieser Frequenz nicht ausbreiten kann. Eine positive Wellenzahl k_x hingegen gibt an, dass sich diese Mode ausbilden wird. Die Frequenz, ab der sich diese Mode ausbilden würde, kann berechnet werden. Die sogenannte Grenzfrequenz ergibt sich aus dem Zusammenspiel der Wellenzahl k_y und der allgemeinen Wellenzahl k . Oberhalb dieser modalen Grenzfrequenz wird die Wellenzahl k_x real, unterhalb der Grenzfrequenz liegt eine rein imaginäre Wellenzahl k_x vor.

$$\begin{aligned}\frac{n\pi}{d} &= \frac{2\pi f}{c_0} \\ f &= \frac{nc_0}{2d}\end{aligned}\tag{2.19}$$

Die erste Frequenz, ab der sich in höheren Frequenzbereichen auch nicht ebene Wellen, das heißt Wellen mit reellen Wellenzahlen k_x , ausbreiten würden, wird als Sperrfrequenz bezeichnet. Unterhalb dieser auch „Cut-on“-Frequenz genannten Frequenz findet ausschließlich ebene Wellenausbreitung im Rohr statt.

$$f_1 = \frac{c_0}{2d}\tag{2.20}$$

Die Beschreibung des Schallfeldes wäre vollständig, wenn nun auch die Amplituden des Schalldrucks der Moden mithilfe der Wellengleichung berechnet werden würden. Für die Schallausbreitung im Rohr ist dies aber nicht mehr relevant, da die Grenzfrequenz das entscheidende Kriterium ist. Weitere Informationen zur Berechnung der modalen Amplituden finden sich in [10].

2.3.2 Dreidimensionale Schallausbreitung

Die Schallausbreitung im Kundt'schen Rohr erfolgt dreidimensional. Die Herleitung der in Abschnitt 2.3.1 gezeigten zweidimensionalen Schallausbreitung ist für das weitere Verständnis notwendig. Ein Kundt'sches Rohr mit rechteckigem Querschnitt befindet sich beispielweise an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig. Abbildung 5 zeigt schematisch ein Kundt'sches Rohr unendlicher Länge mit rechteckigem Querschnitt mit den Kantenlängen x , y und z . Für Rohre mit **rechteckigem Querschnitt** gilt, dass die Schallgeschwindigkeit an den Stellen $y = 0$ und $y = d$ sowie bei $z = 0$ und $z = b$ zu Null wird.

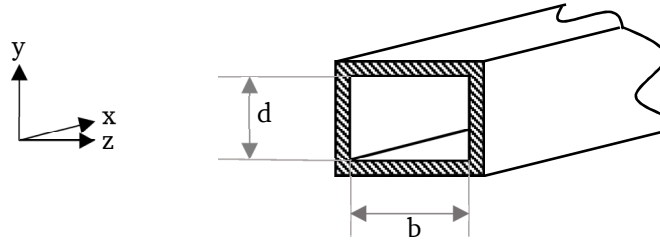


Abbildung 5: Kundt'sches Rohr mit rechteckigem Querschnitt (schematisch)

Die Schalldruckverteilung im Rohr lässt sich folgendermaßen beschreiben:

$$p = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} p_{nm} e^{-ik_x x} \cos\left(\frac{n\pi y}{d}\right) \cos\left(\frac{m\pi y}{b}\right). \quad (2.21)$$

Aus der Lösung der dreidimensionalen Wellengleichung lassen sich „Cut-on“-Frequenzen berechnen, ab der sich Moden ausbilden können. Die Sperrfrequenzen durch die Modenausbildung ergeben sich zu:

$$f_{nm} = \frac{c_0}{2} \sqrt{\frac{n^2}{d^2} + \frac{m^2}{b^2}}. \quad (2.22)$$

Offensichtlich bestimmt die größte Querabmessung die tiefste Sperrfrequenz des Rohres. Für quadratische Querschnitte mit der Seitenlänge b ergibt sich also $f_{01} = 0,5 \frac{c_0}{b}$. Auf weitere Ausführungen zu Rohren mit rechteckigem Querschnitt sei an dieser Stelle erneut auf [10] verwiesen.

Das Kundt'sche Rohr am Fachgebiet SAM hat einen **Kreisquerschnitt**. Zur Beschreibung der Wellenausbreitung in zylindrischen Körpern wird die Bessel-Funktion J_n genutzt. Allgemein breitet sich der Schalldruck im dreidimensionalen Raum nach

$$p = p_0 e^{-jk_z z} (e^{-jk_y y} + r e^{jk_y y}) (e^{-jk_x x} + r e^{jk_x x}) \quad (2.23)$$

aus. Die kartesischen Koordinaten werden durch Zylinderkoordinaten ersetzt (siehe Gleichung (2.24)). Es gilt weiterhin die Randbedingung, dass die Schallschnelle an der Rohrwandung Null sein muss. Damit kann für den Schalldruck folgende Gleichung angegeben werden:

$$p = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} p_{nm} \cos(n\varphi) J_n\left(x_{nm} \frac{r}{b}\right) e^{-jk_z z}. \quad (2.24)$$

An dieser Stelle wird für Details und die Lösung der Gleichung auf MÖSER [10], MORSE und INGARD [23] und SKUDRZYK [24] verwiesen. Moden bilden sich ab den „Cut-on“-Frequenzen aus.

$$f_{nm} = x_{nm} \frac{c_0}{2\pi r} \quad (2.25)$$

Aus den Nullstellen x_{nm} der Bessel-Funktion lassen sich die „Cut-on“-Frequenzen kreiszylindrischer Rohre berechnen. Die ersten Nullstellen der Bessel-Funktion liegen bei beispielsweise [10, 24]:

n	1	2	3	4	5	6	7
x_n	1,841	3,054	3,832	4,201	5,331	6,706	7,016

Die erste Mode wird sich demnach bei

$$f_1 = 0,586 \frac{c_0}{2r} \cong 0,59 \frac{c_0}{2r} \quad (2.26)$$

ausbilden.

MÖSER[10] gibt außerdem den Hinweis, dass sich die erste Sperrfrequenz bei der Frequenz einstellen wird, bei welcher der Flächeninhalt eines Rechtecks A_r genauso groß ist wie der Querschnitt des Rohres A_k (siehe (2.27)). Hergeleitet und mithilfe von (2.22) ergibt sich die Grenzfrequenz f_{01} :

$$A_r = A_k \quad (2.27)$$

$$b^2 = \pi r^2 \rightarrow b = \sqrt{\pi} r$$

$$f_{01} = \frac{c_0}{2} \sqrt{\frac{1^2}{(\sqrt{\pi} r)^2}} \rightarrow f_{01} = \frac{c_0}{2} \frac{1}{\sqrt{\pi} r}$$

$$f_{01} = 0,564 \frac{c_0}{2r}. \quad (2.28)$$

2.4 Vorstellung des im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Messsystems

Das Kundt'sche Rohr (Hersteller: Thomas Schösser Messtechnik) zur Bestimmung des Schallabsorptionsgrades nach DIN EN ISO 10534-2 am Fachgebiet Systemzuverlässigkeit, Adaptronik und Maschinenakustik SAM der TU Darmstadt hat eine Gesamtlänge von 1200 mm und einen Innendurchmesser von 90 mm. Es besteht aus zwei Rohrabschnitten, die über ein Verschlussystem miteinander verbunden werden. Die Teilung des Kundt'schen Rohres ist notwendig, um den Probekörper in die Messstrecke einsetzen zu können. Der Probenhalter ist für bis zu 200 mm dicke Proben konzipiert. Durch einen beweglichen Stempel, mit dem der schallharte Rohrabschluss bewegt werden kann, ist es möglich, verschieden dicke Proben bei gleichbleibendem Abstand der Probenoberfläche zu den Mikrofonen zu vermessen. Der bewegliche Stempel ermöglicht außerdem die Simulation eines Wandabstands hinter einer Probe. Die Länge der Messstrecke beträgt 935 mm.

Für den Lautsprecher am Ende der Messstrecke und den Stempel bleibt demnach noch ein Bauraum von 65 mm. Die Ermittlung des Schallabsorptionsgrades nach DIN EN ISO 10534-2 erfordert Öffnungen des Rohres in der Rohrwandung zur Aufnahme von zwei Mikrofonen. Das im Rahmen der Arbeit genutzte Rohr verfügt über drei Öffnungen zur Aufnahme von Mikrofonen. Damit ergeben sich drei Kombinationsmöglichkeiten für zwei Mikrofone. Der Abstand der Mikrofone zueinander bestimmt den messbaren Frequenzbereich. Zur Montage und Ausführung des Lautsprechers sowie der Mikrofone finden sich Hinweise in den vorliegenden Normen [6, 7]. Abbildung 6 zeigt das verwendete Messsystem.



Abbildung 6: Kundt'sches Rohr am Fachgebiet SAM, Bild: Fraunhofer LBF

Als Mikrofone wurden $\frac{1}{4}$ " Mikrofone der Firma ROGA Instruments verwendet. Die Messwerte wurden, wie in Abbildung 3 gezeigt mit einer externen Soundkarte desselben Herstellers aufgezeichnet. Am Laptop, mithilfe der Software MATLAB, wurden die Signale ausgewertet, Fouriertransformationen berechnet und nach den in Abschnitt 2.2 vorgestellten Gleichungen die frequenzabhängigen Absorptionsgrade ermittelt.

2.4.1 Grenzfrequenzen am Kundt'schen Rohr

Zur Ermittlung der Grenzfrequenzen sind folgende Größen von großer Bedeutung: der Innendurchmesser des Rohres (90 mm) und die möglichen Mikrofonpositionen, die durch die Positionen der Bohrungen in der Rohrwandung vorgegeben sind. Das Kundt'sche Rohr am Fachgebiet SAM verfügt über drei mögliche Mikrofonpositionen in einem Abstand von 59 mm, 107 mm und 180 mm von der Probenoberfläche. In Tabelle 1 werden alle berechneten Grenzfrequenzen übersichtlich und zusammenfassend gezeigt.

Für die untere Grenze des Rohres gilt, dass der Mikrofonabstand mindestens 5 % der längsten Wellenlänge entsprechen sollte, um bei der Signalabtastung keine Fehler zu messen [6]. Je größer der Mikrofonabstand, desto höher die Genauigkeit der Messungen. Der Abstand der Mikrofone ist in den folgenden Gleichungen mit s bezeichnet.

$$\begin{aligned}s &= 5 \% \lambda_{max} \\ \lambda_{max} &= \frac{100 \% \cdot s}{5 \%} \\ f_u &= \frac{c_0}{\lambda_{max}}\end{aligned}\tag{2.29}$$

Das Kundt'sche Rohr am Fachgebiet SAM verfügt über drei mögliche Mikrofonpositionen in einem Abstand von 59 mm, 107 mm und 180 mm von der Probenoberfläche. Beispielhaft sei hier die Rechnung für den Mikrofonabstand von 121 mm gezeigt, das heißt, die Verwendung der Mikrofonpositionen bei 59 mm und 180 mm:

$$\begin{aligned}s &= 121 \text{ mm} \\ \Rightarrow \lambda_{max} &= 2420 \text{ mm} \\ f_u &= \frac{c_0}{\lambda_{max}} = \frac{340 \text{ m/s}}{2,42 \text{ m}} = 140 \text{ Hz}\end{aligned}$$

Für die obere Grenzfrequenz, die „Cut-on“-Frequenz, existieren, wie im vorangegangenen Abschnitt bereits beschrieben, viele verschiedene Berechnungsgleichungen. Zusätzlich zu den Gleichungen sind hier immer die tatsächlichen Grenzfrequenzen für das Kundt'sche Rohr am Fachgebiet SAM angegeben. Die Verwendung der in der DIN EN ISO 10534-2 vorgeschlagenen Gleichung zur Berechnung der „Cut-on“-Frequenz führt mit der Schallgeschwindigkeit c_0 von 340 m/s und dem Innendurchmesser d in m zu

$$f_o < \frac{0,58 \cdot c_0}{d} = 2191\tag{2.30}$$

MÖSER [10] hingegen gibt zur Berechnung der „Cut-on“-Frequenz die Gleichung

$$f_o < \frac{0,59 \cdot c_0}{d} = 2228 \text{ Hz} \quad (2.26)$$

an. Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, ist die Lösung nach MÖSER mathematisch korrekt; in der gültigen Norm wurde gerundet. Ebenfalls gebräuchlich ist die Angabe einer Grenzfrequenz für Kundt'sche Rohre unter der Annahme eines quadratischen Querschnitts, selbst wenn es sich um Rohre mit rundem Querschnitt handelt.

$$f_o < \frac{0,5 \cdot c_0}{d} = 1888 \text{ Hz} \quad (2.31)$$

Der Abstand zwischen den Mikrofonen bietet – nach DIN EN ISO 10534-2 – eine weitere Möglichkeit, den Messbereich einzugrenzen. Durch

$$s < \frac{0,45 \cdot c_0}{f_0} \quad (2.32)$$

ist die obere auswertbare Frequenzgrenze gegeben [6]. Zusammengefasst ergeben sich damit in Tabelle 1 aufgelistete Grenzfrequenzen für das Kundt'sche Rohr:

Tabelle 1: Zusammenfassung berechneter Grenzfrequenzen vom Kundt'schen Rohr am Fachgebiet SAM in Abhängigkeit von den möglichen Mikrofonpositionen

Mikrofonpositionen Abstand von der Probenoberfläche	59 mm 180 mm	107 mm 180 mm	59 mm 107 mm
Mikrofonabstand	121 mm	73 mm	48 mm
f_u nach (2.29)	140 Hz	232 Hz	354 Hz
f_o nach (2.26) (MÖSER; Faktor 0,59)	2228 Hz	2228 Hz	2228 Hz
f_o nach (2.30) (DIN EN ISO 10534; Faktor 0,58)	2191 Hz	2191 Hz	2191 Hz
f_o nach (2.28) (MÖSER-Flächengleichheit; Faktor 0,56)	2115 Hz	2115 Hz	2115 Hz
f_o nach (2.31) (DIN EN ISO 10534; Faktor 0,5)	1888 Hz	1888 Hz	1888 Hz
f_o nach (2.32) (Mikrofonabstand)	1275 Hz	2095 Hz	3187 Hz

Verglichen mit der in der Norm angegebenen Gleichung mit dem Faktor 0,58 ist aus der obigen Tabelle ersichtlich, dass durch die verschiedenen Berechnungsgleichungen der Messbereich leicht vergrößert oder aber deutlich verkleinert werden kann. Bei Verwendung der Gleichung von der Annahme der Flächengleichheit von Quadrat und Kreis nach MÖSER (Faktor 0,56) ergibt sich bei dem mittleren Mikrofonabstand von 73 mm ein etwa 5 % kleinerer Messbereich. Die Verwendung des mathematisch richtig gerundeten Faktors (0,59) zur Berechnung der „Cut-on“-Frequenz nach MÖSER erweitert den Messbereich hingegen um 2 % im Vergleich zur Berechnung der „Cut-on“-Frequenz nach Norm (Faktor 0,58). Größere Abweichungen im Vergleich zur Berechnung nach Norm ergeben sich durch die Verwendung von (2.32), bei der der Mikrofonabstand maßgeblich ist. Hier kann der Messbereich um 7 % kleiner werden – oder sogar um 15 %, wenn sehr konservativ mit der Gleichung für ein Rohr mit quadratischem Querschnitt gerechnet wird.

Die Verwendung der Gleichung $f_o < \frac{0,58 \cdot c_0}{d}$ ist eine *konservative* Abschätzung im Vergleich zur Gleichung von MÖSER ((2.26)). Mathematisch ist die Rundung von MÖSER korrekt, physikalisch wird die so angegebene Grenzfrequenz nicht erreichbar sein. Die Bildung von Quermoden im Rohr beginnt bereits bei $f_o < \frac{0,586 \cdot c_0}{d}$, weshalb für alle folgenden Auswertungen die Gleichung $f_o < \frac{0,58 \cdot c_0}{d}$ als obere Grenzfrequenz genutzt wird.

Die Gleichungen mit der Verwendung der Flächengleichheit und der Analogie zum quadratischen Querschnitt werden bewusst nicht verwendet, da das vorliegende Rohr einen eindeutigen Kreisquerschnitt hat. Sie bieten jedoch eine noch konservativere Abschätzung der „Cut-on“-Frequenz. Besonders Gleichung (2.31) wird häufig verwendet, weshalb die daraus berechnete Grenzfrequenz zur Orientierung in den Auswertungen eingezeichnet ist. Der Abstand der Mikrofone ist zu prüfen und die daraus berechnete Grenzfrequenz mit der „Cut-on“-Frequenz zu vergleichen. Beim mittleren Mikrofonabstand würde sich der Messbereich um 96 Hz verkleinern; bei den anderen Mikrofonabständen ist deutlich zu erkennen, dass die so berechneten Grenzfrequenz entweder deutlich über oder deutlich unter der berechneten „Cut-on“-Frequenz liegen.

2.5 Grundlagen der statistischen Versuchsplanung

Der Begriff statische Versuchsplanung umfasst alle vor Versuchsbeginn angewandten Methoden zur Feststellung der notwendigen Versuchszahl, um funktionalen Beziehungen zwischen den Variabilitäten in den Ein- und Ausgangsgrößen eines Systems zu finden. Der Vorteil dabei ist, dass die Versuchsdurchführung an vorhandene Ressourcen und den gewünschten Informationsinhalt angepasst werden kann. Bei einfachen Systemen, oder Systemen, deren Verhalten sich nicht analytisch beschreiben lässt, können One-factor-at-a-time-Analysen Erkenntnisse bringen. Dabei wird ausgehend von einer Einstellung jeweils ein Faktor im System geändert und die Auswirkung auf das

Systemverhalten ermittelt. Die neue Einstellung wird beibehalten und der nächste Faktor untersucht. Beim Aufstellen eines Versuchsplans können zwei Wege beschritten werden: die voll- oder die teilfaktorielle Versuchsplanung. Im Rahmen der vollfaktoriellen Planung wird der Einfluss auf das Systemverhalten jedes Faktors geprüft, für den es mindestens eine, meist mehrere Einstellungen, sogenannte Faktorstufen, gibt. Damit werden alle möglichen Einstellungen geprüft. Grafisch lässt sich das an einem Würfel, dem sogenannten Versuchswürfel, darstellen. Die Kantenlänge entspricht einem Faktor; die Faktorstufen werden durch die Eckpunkte des Würfels dargestellt. Bei einem vollfaktoriellen Plan mit drei Faktoren und jeweils zwei Stufen sind alle acht Eckpunkte des Würfels belegt – es werden also acht Versuche durchgeführt. Bei den teilfaktoriellen Versuchsplänen werden durch geschickte Wahl der Faktoren und Faktorstufen einzelne Versuchspunkte nicht mehr geprüft, wodurch sich der Versuchsaufwand reduziert (weitere Informationen beispielsweise in [27]). Der Versuchswürfel wäre nicht vollständig belegt.

Mithilfe eines sog. t-Tests werden die Mittelwerte \bar{y}_1, \bar{y}_2 zweier unabhängiger Stichproben y_1, y_2 aus zwei Grundgesamtheiten berechnet und geprüft, ob die Mittelwerte der beiden Grundgesamtheiten μ_1 und μ_2 verschieden sind. Der t-Test prüft damit die Hypothesen

$$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0.$$

Die Nullhypothese H_0 besagt in diesem Fall, dass sich die Mittelwerte der Grundgesamtheiten nicht voneinander unterscheiden. Die Nullhypothese beinhaltet somit keine andere, aus einer konkurrierenden Theorie abgeleitete Aussage [25]. Eine Aussage ist allein über die Alternativhypothese H_1 möglich. Diese sollte so formuliert sein, dass sie der inhaltlichen Hypothese entspricht. Bei der Überprüfung der beiden Hypothesen können bei der Interpretation Fehler entstehen. Tabelle 2 zeigt die möglichen Entscheidungen.

Tabelle 2: mögliche Entscheidungen und Fehlertypen des t-Tests

Schlussfolgerung \ Realität	H_0	H_1
	H_0	H_1
H_0	kein Fehler	β -Fehler (Fehlertyp II)
H_1	α -Fehler (Fehlertyp I)	kein Fehler

Wird fälschlicherweise die richtige Nullhypothese zugunsten der Alternativhypothese abgelehnt, spricht man vom Fehlertyp I. Die Wahrscheinlichkeit hierfür wird angegeben mit α . Eine fälschliche Entscheidung zugunsten H_0 wird als Fehlertyp II mit der Wahrscheinlichkeit β angegeben. Die Wahrscheinlichkeit für Fehlertyp I wird im t-Test ermittelt. Hypothesentests basieren auf

Widerspruchsbeweisen. Soll bewiesen werden, dass H_1 stimmt, wird zunächst H_0 angenommen und dann versucht, diese zu widerlegen [26]. Eine Entscheidung aufgrund des Ergebnisses des t-Tests für H_0 bedeutet nicht, dass H_0 bewiesen, sondern nicht widerlegbar ist.

Klassischerweise werden beim t-Test nur zwei Proben miteinander verglichen, weil nur ein Faktor verändert wird. Bei einer größeren Probenzahl erhöht sich der Rechenaufwand rasch, weil die Proben paarweise miteinander verglichen werden müsse. Sollen bei sechs Proben jeweils zwei miteinander verglichen werden, ergeben sich 15 mögliche Kombinationen. In dieser Arbeit liegen allerdings 3096 Ergebnisse aus Messungen vor (Begründung für die Zahl siehe Abschnitt 5.5).

Daraus ergeben sich nach den Regeln der Kombinatorik (unter Ausschluss von Wiederholung) $\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!} = 4791060$ Kombinationen ($n = 3096$; $k = 2$). Daher wird in [27] bei einer großen Probenanzahl die Verwendung der Varianzanalyse empfohlen, wobei einige Bedingungen erfüllt sein müssen. Für die Varianzanalyse müssen die Proben voneinander unabhängig sein. Das ist gewährleistet, weil jede Probe separat und zum Testen der jeweiligen Faktoren gefertigt wurde. Der folgende Abschnitt beschreibt die Varianzanalyse und die darin enthaltenen einzelnen Berechnungsschritte näher.

2.6 Grundlagen der Varianzanalyse

Die Varianzanalyse ist ein Werkzeug zur Identifikation signifikanter Unterschiede zwischen den Faktoren oder innerhalb der Faktorstufen. Allgemein gilt: Es werden Gruppen gebildet, in denen nur die Ergebnisse eines Experiments vorkommen, die untersucht werden sollen. Eine Gruppe enthält demnach nur die Ergebnisse der Messkampagne mit den gleichen Einflussfaktoren. Innerhalb jeder Gruppe wird die Varianz berechnet. Außerdem wird die Varianz zwischen den Gruppen und zwischen den Mittelwerten der Gruppen und dem Mittelwert über die gesamte Zielgröße berechnet.

Varianz, ein statistisches Maß für die Streuung/Abweichung einer Zufallszahl y von ihrem Erwartungswert μ , ist nach Gleichung (2.33) definiert. Die Gesamtvarianz eines Systems ist die vollständige Quadratsumme der Abweichungen der einzelnen Beobachtungen y vom Gesamtmittel $\bar{\mu}$. Die Gesamtvarianz Q wird auch als *total sum of squares* (TSS) bezeichnet [25, 26, 28].

$$Q = \text{TSS} = \sum_{i=1}^n (y - \bar{\mu})^2 \quad (2.33)$$

Sie lässt sich in zwei Teilvarianzen Q_1 und Q_2 zerlegen. Diese Streuungszerlegung liefert:

$$Q_1 = \text{SSB} = n \sum_{i=1}^m (\bar{y}_i - \bar{\mu})^2. \quad (2.34)$$

$$Q_2 = \text{SSW} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (2.35)$$

Die Quadratsumme der Abweichungen zwischen den Gruppen Q_1 ist die Summe der quadratischen Abweichungen der Gruppenmittel \bar{y}_i vom Gesamtmittelwert $\bar{\mu}$. Die englische Bezeichnung lautet *sum of squares between groups* (SSB). Sie ist ein Maß für den Unterschied der systematischen Fehler zwischen den Messungen und berechnet damit den Anteil der Faktoreffekte auf die Gesamtvariabilität. Mit (2.35) wird die Quadratsumme der Abweichungen innerhalb einer Gruppe berechnet. Das bedeutet, dass Q_2 , auch bezeichnet als SSW (*sum of squares within groups*), eine Fehlergröße ist, die in Auswertgrößen als *error* bezeichnet wird. Sie wird verursacht durch die zufälligen Abweichungen der Werte jeder Messreihe vom Gruppenmittelwert \bar{y}_i [28].

Ausgehend davon, dass die Nullhypothese zutrifft, genügt zur Berechnung die Verteilungsfunktion einer F-Verteilung mit $(m - 1, m(n - 1))$ Freiheitsgraden (Gleichung (2.37)). Freiheitsgrade geben an, an wie vielen Stellen die anderen Parameter unter Kenntnis von Verteilungseigenschaften Variationsmöglichkeiten haben, ohne den für den jeweils relevanten Versuch bedeutenden Parameter zu beeinflussen [25]. Der Nenner in der Gleichung zur Berechnung der Varianz gibt die Anzahl der mit der Stichprobenvarianz verbundenen Freiheitsgrade an. Ein Faktor mit m Stufen verfügt über $m - 1$ Freiheitsgrade, ein Versuchsplan mit n Messungen über $m(n - 1)$ Freiheitsgrade. Die Differenz zwischen der Gesamtzahl und der durch das Modell benutzten der Freiheitsgrade wird dem Fehler (*error*) zugeordnet. Der Freiheitsgrad für SSB ist demnach $(n - 1)$. Die Stichprobenvarianz wird auch als mittleres Quadrat (*mean square* (MS)) bezeichnet (Gleichung (2.36)). Sie wird durch die Division der Quadratsumme durch die jeweiligen Freiheitsgrade berechnet. Damit ergibt sich:

$$\text{MS}_{\text{SSB}} = \frac{\text{SSB}}{m - 1}. \quad (2.36)$$

Die Berechnung von SSW erfolgt analog. Der F -Wert zeigt die Unterschiede zwischen zwei Faktorstufen in Relation zur Streuung der Versuche (SSW, *error*). Je größer ein F -Wert ist, desto stärker unterscheidet er sich vom unerklärbaren Teil der Streuung und umso signifikanter ist der zugrunde gelegte Effekt.

$$F = \frac{\frac{Q_1}{(m - 1)}}{\frac{Q_2}{m(n - 1)}} = \frac{Q_1 m(n - 1)}{Q_2 (m - 1)} \quad (2.37)$$

Die bereits genannten mittleren Quadrate ((2.36)) erlauben es, (2.37) umzuformulieren:

$$F = \frac{MS_{SSB}}{MS_{SSW}}. \quad (2.38)$$

Ein Einflussfaktor wird als wesentlich erkannt, wenn die Hypothese abgelehnt wird und F_α das $(1 - \alpha)$ -Quantil dieser Verteilung ist. „[Der Signifikanztest muss außerdem zeigen, dass] das aus den einzelnen Messungen berechnete F der Ungleichung $F > F_\alpha$ genügt.“ [28]

Eine Aussage darüber, ob ein Faktor einen Einfluss hat, ist erst durch den p -Wert möglich. Dieser gibt die Wahrscheinlichkeit für den Fehlertyp I an. Die Nullhypothese (Faktor hat keinen Einfluss) wird verworfen, wenn p größer als das gewählte Signifikanzniveau ist. Anderenfalls wird die Alternativhypothese (Faktor hat einen Einfluss) angenommen.

2.7 Materialmodelle zur Beschreibung der Schallabsorption in Schaumstoffen

MECHEL hat sich intensiv mit allen Mechanismen der Schallabsorption auseinandergesetzt. Er beschreibt in [29] folgende Mechanismen der Schallabsorption:

- Reibung der viskosen Luft an der Oberfläche der Matrix
- periodische Kompression und Dilatation
- Impulsdissipation
- Schwingungen in der Matrix und daraus resultierende Wechselwirkung mit der Luft

BIOT liefert in [30, 31] eine analytische Beschreibung der Schallabsorption. Er weist bei der Schallausbreitung drei Wellenarten nach: zwei Longitudinalwellen und eine Scherwelle. Die Biot-Theorie wird vielfach für die Beschreibung poröser Materialien verwendet. Außer den mechanischen Eigenschaften der Luft beschreibt das Zweiphasenmodell auch jene der Matrix.

Neben der analytischen Betrachtung nach BIOT bestehen phänomenologische und empirische Modelle zur Beschreibung der Schallabsorption. Alle Modelle gelten ausschließlich für offenporige Materialien, deren Phasen in sich verbunden sind. Bei allen Modellen gilt die Annahme, dass Wellenlängen der anregenden Schallwellen viel größer sind als die Ausdehnung der Poren in der Matrixstruktur. Die Betrachtung als homogenes Medium bedeutet, dass die mögliche Verformung der Matrixstruktur die Eigenschaften der Luft nicht verändert. Mehr zur Theorie des homogenen Mediums findet sich in Anhang D ab Seite 165.

Bereits in den 1970er-Jahren entwickelten DELANY und BAZLEY [32] ein empirisches Materialmodell für Faserstoffe, in dem sie die Impedanz eines Materials asymptotisch an Messergebnisse annäherten. Überarbeitet wurde das Modell von MIKI [33], um teilweise negative Ergebnisse bei der Berechnung

des Realteils der Impedanz auszugleichen. Beide Modelle gelten nur für Fasermaterialien. Die Berechnungsgleichungen finden sich in Anhang D ab Seite 165.

Das derzeit am häufigsten verwendete phänomenologische Modell, das JCA-Modell (mit Erweiterungen), basiert auf der Arbeit von JOHNSON, KOPLIK und DASHEN [34], bei der eine starre Matrixstruktur und beliebige Porengeometrien angenommen werden. Das von CHAMPOUX und ALLARD aufgegriffene Modell wurde zum JOHNSON-CHAMPOUX-ALLARD-Modell weiterentwickelt [35]. Mit zwei frequenzabhängigen Kenndaten lassen sich die akustischen Eigenschaften eines Materials beschreiben: Die komplexe Dichte $\tilde{\rho}(\omega)$ der Matrix beschreibt das viskos-träge-dissipative Verhalten der Matrix. Eingangsparmeter des Modells sind die Porosität ϕ , die Strömungsresistanz Ξ , das obere Frequenzlimit der Tortuosität α_∞ und die charakteristische viskose Länge Λ . Einige Kenngrößen der Modelle sind aus der Literatur zu entnehmen [35]

$$\tilde{\rho}(\omega) = \frac{\alpha_\infty \rho_0}{\phi} \left[1 + \frac{\Xi \phi}{i \omega \rho_0 \alpha_\infty} \sqrt{1 + i \frac{4 \alpha_\infty^2 \eta \rho_0 \omega}{\Xi^2 \Lambda^2 \phi^2}} \right] \quad (2.39)$$

Der komplexe dynamische Kompressionsmodul $\tilde{K}(\omega)$ berücksichtigt den thermisch-dissipativen Effekt.

$$\tilde{K}(\omega) = \frac{\kappa \cdot P_0 / \phi}{\kappa - (\kappa - 1) \left[1 + \frac{8 \eta}{i \rho_0 \omega Pr \Lambda'^2} \sqrt{1 + i \frac{\rho_0 \cdot \omega \cdot Pr \cdot \Lambda'^2}{16 \cdot \eta}} \right]^{-1}} \quad (2.40)$$

Eingangsparmeter sind hierbei die Porosität ϕ und die charakteristische thermische Länge Λ' . Letzterer kann als durchschnittlicher Porenradius angenommen werden, η beschreibt die dynamische Viskosität, Pr die Prandtl-Zahl (Verhältnis zwischen kinematischer Viskosität und Temperaturleitfähigkeit) und P_0 den aktuellen Luftdruck des Fluids. Bei tiefen Frequenzen liefert das Modell keine zufriedenstellenden Ergebnisse, weshalb LAFARGE das Modell erneut erweiterte [36]. Als weiterer Eingangsparmeter für die Bestimmung des Kompressionsmoduls kommt beim JOHNSON-CHAMPOUX-ALLARD-LAFARGE (JCAL)-Modell die thermisch-statische Durchlässigkeit k_0' (Permeabilität) hinzu.

$$\tilde{K}(\omega) = \frac{\kappa P_0 / \phi}{\kappa - (\kappa - 1) \left[1 - i \frac{\phi \eta}{\rho_0 \omega Pr k_0'} \sqrt{1 + i \frac{4 k_0'^2 \rho_0 \omega Pr}{\eta \Lambda'^2 \phi^2}} \right]^{-1}} \quad (2.41)$$

Um auch geschlossene Poren im Schaumstoff berücksichtigen zu können, wurde das Modell von PRIDE, MORGAN und GANGI [37] überarbeitet. Die Berechnungsgleichungen dafür finden sich in Anhang D ab Seite 165.

3 Literatur zum Thema Unsicherheit bei der Absorptionsgradbestimmung im Kundt'schen Rohr

Nachdem der grundlegende Aufbau des Messsystems sowie die mathematischen Grundlagen zur Schallausbreitung und zur im Rahmen der Arbeit verwendeten Statistik bekannt sind, soll im Folgenden der Stand der Forschung und Technik im Bereich der Absorptionsgradbestimmung poröser Materialien dargestellt werden.

Trotz des unkomplizierten Aufbaus besitzt das Kundt'sche Rohr, wie zahlreiche Quellen belegen, bei der Absorptionsmessung einige Unsicherheitsquellen. Die meisten davon sind durch die existierenden Normen [6, 7, 18, 19] beherrschbar. Auf die Herstellung von Schaumstoff und die damit verbundene Unsicherheit im Herstellungsprozess kann im Rahmen dieser Arbeit nicht eingegangen werden. Eine Streuung des Messergebnisses durch die Materialinhomogenität wird angenommen [6], weshalb für jede Messung auch mindestens zwei [6] oder besser drei² unabhängige Probekörper verwendet werden sollten. Im Rahmen der Arbeit werden jeweils drei Probekörper gefertigt. Die aus den gemessenen Schalldrücken berechneten Schallabsorptionsgrade jeder der drei Proben werden arithmetisch gemittelt, um einen frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrad für das Schaumstoffmaterial anzugeben. Die Normen beschreiben den Aufbau eines Kundt'schen Rohres präzise und geben Hinweise zur Konstruktion. Es finden sich beispielsweise Empfehlungen zum Rohrdurchmesser und Rohrquerschnitt, zur Rohrlänge und zur Beschaffenheit des Stempels, zur Wandstärke, zu den Mikrofonpositionen und zur Lagerung des Rohres. Aktuelle Forschungen greifen einzelne Aspekte zum Aufbau des Rohres auf, beschäftigen sich aber hauptsächlich mit dem Einbau der Probe im Rohr und dem Verhalten des Materials im Rohr bei Schalleinfall und der damit verbundenen Unsicherheit. Hauptsächlich werden derzeit allerdings Materialmodelle weiterentwickelt. Besonders hervorzuheben sind hier Arbeiten, die die mechanischen Eigenschaften poröser Materialien und deren Bestimmung in den Fokus stellen.

3.1 Unsicherheit im Messsystem

Das Messverfahren zur Bestimmung des Schallabsorptionsgrades im Kundt'schen Rohr nach DIN EN ISO 10534-2 ist ein relatives Verfahren; das heißt die absolute Qualität der verwendeten Mikrofone spielt keine entscheidende Rolle [13, 38], weil mit der Übertragungsfunktion zwischen den gemessenen Schalldrücken gerechnet wird. Das zusätzliche Tauschen der Mikrofone nach [6, 19] und ein erneutes Vermessen der Probe führen dazu, dass sich durch Mittelung der Messergebnisse die Fehler durch verschiedene Amplituden- und Phasengänge der Mikrofone herauskürzen. Mit der

² Gespräch mit Karl-Heinz Bay, Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP in Stuttgart auf der DAGA 2015 in Nürnberg (16.–19.03.2015).

Methode der vertauschten Mikrofone können gute Messungen bis hinab zu 100 Hz durchgeführt werden [39]. MÖSER [10] betont, dass sich Unterschiede im Phasengang der Mikrofone nicht vollständig korrigieren lassen und zu Messfehlern führen können. Dies betrifft vor allem tiefe Frequenzen, bei denen kleine Schallabsorptionsgrade aus den Messergebnissen berechnet werden. Das Verfahren, zwei Mikrofone bei der Bestimmung des Absorptionsgrades zu verwenden, wurde ursprünglich am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP in Stuttgart entwickelt [40] und in den damaligen Normentwurf aufgenommen. Bei der Bestimmung des Schallabsorptionsgrades aus dem Stehwellenverhältnis nach [7] ist besonders das Signal-zu-Rausch-Verhältnis entscheidend. Schalldruckminima dürfen nicht im Messrauschen untergehen, Schalldruckmaxima nicht zu Verzerrungen des Messsignals führen. Dafür wird ein Dynamikbereich von mindestens 60 dB gefordert [7, 18, 41, 42]. SEYBERT ET AL. [13, 38] kritisieren die in den Normen angegebene Mindestrohrlänge von mindestens drei Rohrdurchmessern und schlagen eine Rohrlänge von mindestens 15 Rohrdurchmessern vor. Laut den betreffenden Normen muss das Rohrmaterial starr, glatt, staubfrei und undurchlässig sein, darf (außer für die Mikrofone) keine weiteren Öffnungen haben und muss vernachlässigbar kleine Dämpfungseigenschaften besitzen. Materialdämpfung innerhalb der Messapparatur bewirkt eine verringerte Ausprägung der Schalldruckmaxima und -minima der stehenden Welle über den Rohrverlauf [16, 21]. Um diese Verfälschung zu kompensieren, werden in allen aktuellen Normen Gleichungen zur Verfügung gestellt, mit denen sich das Messergebnis mathematisch korrigieren lässt. Kritik an dieser Korrektur wird durch TERAOKA und SEKINE in [43] geübt. Sie kritisieren, dass nur ein Teil des tatsächlichen Dämpfungseinflusses betrachtet wird. Stattdessen stellen sie eine genauere Korrektur vor. Die Montage der Mikrofone im Rohr ist ebenfalls von Bedeutung. Sie müssen bündig mit der Rohrwandung sein und dürfen nicht selbst zu Schwingungen angeregt werden. MÖSER [10] konkretisiert, dass hineinragende Mikrofone Unstetigkeiten bei der Schallausbreitung sind und das Messergebnis stark verfälschen, da Effekte wie Beugung, Streuung, Brechung oder Dämpfung auftreten können. Obwohl der Fokus von DICKENS' ET AL. Veröffentlichung [41] auf der genauen Bestimmung der Impedanz einer Materialprobe und den dafür verwendeten Verfahren liegt, weisen sie auf die Bedeutsamkeit eines konstanten Rohrdurchmessers zur Vermeidung von Impedanzsprüngen mit folgender Begründung hin: Das Ergebnis würde sich aus der Impedanz der Materialprobe und dem Impedanzsprung an der Unstetigkeitsstelle im Rohr zusammensetzen. MÖSER [10] leitet die daraus resultierende zusätzliche Reflexion an der Wandung her, indem er das modale Wellenfeld analysiert, das sich bilden würde. In diesem Zusammenhang führt er auch den Begriff der „Cut-on“-Frequenz ein. Die Gleichungen zur Lösung der Schallausbreitung in Rohren mithilfe der Bessel-Funktionen wurden auch schon von SKUDRZYK in [24] hergeleitet. Die Erweiterung des Messbereichs durch eine mathematische Zerlegung des sich im Rohr einstellenden modalen Wellenfeldes werden von PRISUTOVA ET AL. [44] vorgeschlagen. Ändern sich die Umgebungsbedingungen während einer Messung, beispielsweise durch eine Temperaturerhöhung, ändert sich auch die Schallgeschwindigkeit.

Können die in den Normen geforderten Temperaturgrenzen von $\pm 0,5$ K nicht eingehalten werden, fordert SEYBERT [13] eine Möglichkeit, diesen Faktor in der Software ändern zu können. Vorliegende Normen geben außerdem Hinweise auf tolerierbare Abweichungen in der Luftfeuchtigkeit und im Luftdruck. Kommerzielle Software erlaubt die Eingabe der aktuellen Umgebungsvariablen [45, 46]. Dort werden auch Hinweise zur Signalerzeugung, -filterung und -wiedergabe gegeben. Prinzipbedingt wird beim Verfahren mit Stehwellen ausschließlich mit einer monofrequenten Anregung gearbeitet, wohingegen beim Verfahren mit Übertragungsfunktion vor allem Rauschsignale empfohlen werden. DICKENS ET AL. [41] beschreiben ein Verfahren, bei dem durch ein speziell verzerrtes Anregungssignal der Signal-Rausch-Abstand um das bis zu Zehnfache verbessert werden kann. In [6] wird dies aufgegriffen und empfohlen.

3.2 Unsicherheit bei der Herstellung und beim Einbau der Probe

Einige Prüflinge aus Fasermaterial werden durch die Bedingungen beim Einbau in die Messapparatur zu einem schwingungsfähigen System, das unter Umständen durch den Luftschall angeregt wird. Zuerst wurde dies von KOSTEN und JANSON 1957 in [47] veröffentlicht. BOLTON [48], SONG ET AL. [22, 49], TSAY und YEH [50] und andere greifen dies in aktuelleren Veröffentlichungen auf.

In der Literatur besteht Einigkeit darüber, dass die Form des Prüflings der Kontur des Rohres entsprechen muss. Der Prüfling kann, um Luftspalte am Rand der Probe zu vermeiden, mit Vaseline oder einer Bandage abgedichtet werden [6].

Darüber, ob der Prüfling etwas größer als, genau wie oder etwas kleiner als der Rohrdurchmesser zugeschnitten werden soll, herrscht in der Literatur Uneinigkeit. KINO und UENO [51] sowie KINO ET AL. [52] stellen fest, dass Proben mit geringem Übermaß leichter zu Eigenschwingungen angeregt werden. Sie empfehlen den Probendurchmesser um 0,5 mm bis 1 mm zu reduzieren, um weder Leckageeffekte durch Luftspalte am Rand noch Resonanzeffekte durch eine zu stark komprimierte Probe zu haben. HOROSHENKOV und KHANS [11] Untersuchung zeigt, dass Unternehmen und Forschungseinrichtungen Prüflinge eher mit leichtem Übermaß fertigen, und betonen, dass eine schwache Randverspannung etwa einer Loslagerung entspricht. Im Realfall entspricht dies einer unendlich großen Absorberplatte [11, 53]. Die Auswirkungen eines Übermaßes von 0,5 mm werden von SEYBERT ET AL. [38] deutlich gezeigt: die Eigenschwingungen der Probe führen bei dem von ihnen untersuchten Material zu einem auf einen Frequenzbereich von 500 Hz begrenzten, ab 2000 Hz auftretenden Einbruch des Absorptionsgradspektrums. Sie zeigen auch, dass dünne Materialien eine kleinere Streuung zwischen den Proben untereinander haben als dicke Materialien. TSAY und YEH [50] unterstützen die Aussagen von KINO und HOROSHENKOV. Sie erstellen ein FE-Modell eines freigelagerten (Loslagerung) und eines an der Mantelfläche fixierten (Festlagerung) zylindrischen

Schaumstoffprüflings und berechnen die Schallabsorption. Die Loslagerung entspricht der Berechnung der Schallabsorption einer unendlichen Platte, wie es auch PILON ET AL. [54] publiziert haben. Die auf der Mantelfläche aufgebrachte Randbedingung einer Festlagerung zeigt, dass sich das Maximum der Schallabsorption zu tieferen Frequenzen verschiebt. Den beobachteten Effekt weisen sie messtechnisch mithilfe verschiedener Probendurchmesser nach und zeigen damit, dass der Absorptionsgrad aus Messungen von Proben mit Loslagerung – was einem Untermaß der Probe entspricht – vielmehr mit der numerischen Lösung für eine unendliche Platte übereinstimmt. TSAY und YEH [50] erkennen außerdem, dass ein größerer Probenradius im Verhältnis zur Probendicke das Problem der Eigenschwingformen der Materialprobe verringert. PILON ET AL. [53] schlagen dennoch vor, die Proben ein wenig größer als den Rohrrinnendurchmesser zu fertigen. Die resultierende Kompression der Probe betrage ihnen zufolge weniger als 1 %, stelle aber sicher, dass keinesfalls Luftspalte am Rand auftreten. Eine Versteifung der Proben im Rohr durch Übermaß wird auch von VIGRAN ET AL. [55] durch Messungen und einen Vergleich der Ergebnisse mit Daten aus FE-Berechnungen basierend auf dem BIOT-Modell (siehe Kapitel 6.3) bestätigt. Auch ATALLA und PANNETON [56] empfehlen, die Probe 1 mm größer als den Innendurchmesser des Rohres zu fertigen. Sie verwenden wasserstrahlgeschnittene Proben für ihre Untersuchungen.

Das Problem, dass die Probe einerseits im Rohr fixiert sein muss, aber andererseits nicht verspannt werden darf, greifen auch ALLARD und ATALLA [57] und BOLTON [48, 58] auf. ALLARD und ATALLA stellen fest, dass die $\lambda/4$ -Resonanz des Schaumstoffes (lokales Maximum der Absorption bedingt durch die Dicke des Schaumstoffes) im Rohr höher ist als bei Messungen des Absorptionsgrades nach anderen Verfahren, was auf die Randverspannungen der Probe im Rohr zurückzuführen ist. In einer Veröffentlichung von CASTAGNEDE ET AL. [59] wird die Auswirkungen von Kompression einer Fasermaterialprobe auf den Absorptionsgrad beschrieben. SONG ET AL. [22, 49] nutzen ein Laser-Doppler-Vibrometer, um die Bewegung der Matrix, in diesem Fall eines Faserabsorbers, zu bestimmen. Sie erzielen eine sehr gute Übereinstimmung von Simulationsergebnissen mit den Ergebnissen aus Messungen mit der Laser-Doppler-Vibrometrie bei der Bewegung der Matrix und gehen von einer Festlagerung aus. Das in der Simulation verwendete Materialmodell wird ebenso wenig spezifiziert, wie die genaue Montage der Probe.

BOLTON untersucht in [48, 58] Unterschiede in Messergebnissen und vermutet zunächst Randverspannungseffekte. Dies widerlegt er selbst durch verschiedene experimentelle Versuche und kommt zu dem Schluss, dass vor allem Schwingungen der Vorder- und Rückseite der Probe den Absorptionsgrad beeinflussen. Dazu vergleicht er eine auf der Vorderseite mit einer Folie beschichtete Probe mit einem Helmholtzresonator und nutzt eine Lasermessung, um eine Probenoberfläche abzutasten. Er bestätigt damit erstmals messtechnisch, dass die Skelettstruktur des Schaumstoffes zu Schwingungen angeregt wird. Seine Proben werden mit einem rotierenden Messer gefertigt und mit einer

Rasierklinge nachbearbeitet [48]. Grundlage dieser Arbeiten waren Untersuchungen zum Schalldurchgang an Fasermaterialien [60], bei denen eine eindeutige Scherbewegung der Probe messtechnisch nachgewiesen und durch Simulationsrechnungen bestätigt werden konnte.

FENG zeigt in [61], dass die Bestimmung des Absorptionsgrades und weiterer akustischer Parameter mit einigen mathematischen Umformungen in einem 4-Mikrofonrohr (eigentlich genutzt zur Schalldurchgangsmessung) sehr gut funktioniert und zudem das Problem mit der Ankopplung der Probe an die Rückwand und dabei möglicherweise entstehenden Luftspalten umgangen werden kann. Auch BARNARD und RAO [62] verdeutlichen in einer Reihenuntersuchung von Schaum- und Fasermaterialien bei einer Schalldurchgangsmessung in einem 4-Mikrofonrohr den Einfluss von Randverspannungen und Proben mit deutlichem Untermaß. Übermaßproben führen dazu, dass die Poren in den Randbereichen verschlossen werden und sich die Matrixstruktur versteift. Der Absorptionsgrad wird in einem weiten Frequenzbereich angehoben. BARNARD und RAO schlagen eine Korrekturgleichung vor, die den Einfluss von Luftspalten um eine Untermaßprobe bei einer Schalldurchgangsmessung ausgleicht. Sie empfehlen einen Zuschnitt von Proben mit Wasserstrahl. Der Versteifungseffekt der Proben war bei kleinen Rohrdurchmessern stärker zu beobachten. Auch DONATO [63] ermittelt in seinen Untersuchungen eine Schwingungsanregung der Matrixstruktur durch Schalleinfall zunächst bei Messungen im Vollraum und bestätigt diese Ergebnisse anschließend durch Messungen im Kundt'schen Rohr.

Das Messergebnis wird von der Art des Zuschnitts beeinflusst. Die US-amerikanischen Normen [18] und [19] erwähnen, ohne genauere Angaben, dass die größte Unsicherheit in der Messung des Absorptionsgrades bei der Herstellung des Probekörpers entstehen. Eine Veröffentlichung von STANLEY [64] veranschaulicht, zu welchen Abweichungen im Absorptionsgrad schon kleinste Maßabweichungen der Prüflinge führen können. Er zeigt dies am Beispiel wasserstrahlgeschnittener Proben. Zur Wahrung der Maßhaltigkeit wird von Herstellern rotierendes Messer angeboten. Ein Foto in der Veröffentlichung von STANLEY belegt, zu welchen Maßabweichungen es trotz der Verwendung des rotierenden Messers kommen kann, wenn es eher wie ein Stanzwerkzeug verwendet wird. Der Hersteller Spectronics gibt in seinem Handbuch [65] Hinweise, um Unsicherheit bei der Messung des Absorptionsgrades zu vermeiden. Es werden Zuschnittsmöglichkeiten vorgestellt und Einbauvorschriften gegeben, um wiederholbare Messergebnisse zu erzielen. BREZNY und GREEN [66] untersuchen die Schnittkantenbeschaffenheit an Proben aus vernetzter Glasfaser und stellen fest, dass die Zellen am Probenrand nur wenig zum GesamtabSORPTIONSVERMÖGEN der Probe beitragen, mechanisch allerdings stark geschwächt sind. Da mehrere Probendurchmesser mit unterschiedlichen Porendurchmessern untereinander verglichen werden, folgern sie, dass mit zunehmender Porengröße auch der beschädigte Bereich am Probenrand größer wird. CUMMINGS [67] untersucht den Einfluss von Luftspalten am Probenrand theoretisch und messtechnisch. Er stellt fest, dass Materialien mit großem

Strömungswiderstand empfindlicher auf Luftspalte reagieren, als Materialien mit einem geringen Strömungswiderstand. Auch für PILON ET AL. [53, 54] ist nicht die Schnittfläche oder die Probengröße entscheidend. Sie untersuchen 30 Materialien und stellen fest, dass es einige gibt, die stärker auf Randverspannungen reagieren als andere. Aus den Erkenntnissen wird eine neue akustische Größe, die FAE (Frame Acoustic Excitability), abgeleitet. Die FAE hat die Einheit Leistung pro Masse (W/kg) und beschreibt den Anteil der Luftschallenergie, der in die Skelettstruktur des Materials geleitet wird und diese zu Schwingungen anregt. Ein höherer Wert der FAE steht also für die Tendenz eines Materials, zu Eigenschwingformen angeregt zu werden und somit für Messungen im Kundt'schen Rohr unbrauchbar zu sein. Diese Größe hat sich in den letzten Jahren in der Literatur nicht durchgesetzt und wird daher im Rahmen dieser Dissertation nicht weiter betrachtet.

Randverspannungseffekte wurden auch in FE-Untersuchungen von KANG und BOLTON [68] untersucht, wobei festgestellt wurde, dass der Imaginärteil der Impedanz durch die Randverspannung der Probe stark ansteigt. Bereits 1964 wurden Messungen des Absorptionsgrades aus dem Hallraum mit denen aus Impedanzmessungen von OLYNYK und NORTHWOOD verglichen [69]. Die Vor- und Nachteile der Messungen im Hallraum und im Impedanzrohr werden von MCGRORY ET AL. [70] gegenübergestellt. Weitere Möglichkeiten den Absorptionsgrad anhand von akustischen Sonden zur Beschreibung eines akustischen Feldes zu ermitteln, werden von HIROSAWA ET AL [71] vorgestellt. Mithilfe des Allard-Champoux-Modells [35] werden die Ergebnisse mit Ergebnissen aus BEM-Simulationen verglichen.

3.3 Materialmodelle zur Beschreibung der Absorptionseigenschaften von Schaumstoff

Allgemeingültig und umfassend, ist das 1956 aufgestellte und ständig weiterentwickelte Biot-Modell [30, 31, 72], ein analytisches Modell zur Beschreibung der Schallausbreitung in porösen, elastischen Strukturen. Zuvor beschrieben ZWIKKER und KOSTEN [3] die Mechanismen der Schallabsorption ausgehend von einem Materialmodell mit zylindrischen Poren und unter Berücksichtigung thermischer und viskoser Materialparameter.

DELANY und BAZLEY [32] entwickelten nach Experimenten an Faserstoffen basierend auf Approximation an Messwerten ein empirisches Modell zur Berechnung der Impedanz dieser Materialien. Einziger Eingangsparameter in das Modell zur Berechnung der Absorption ist der Strömungswiderstand. Das Modell bildet die Grundlage für zahlreiche Weiterentwicklungen für spezielle Aufbauten oder besondere Fasermaterialien durch CUMMINGS [73], MIKI [33] und KOMATSU [74]. CUMMINGS und BEADLE [75] untersuchen offenporige Schäume messtechnisch, leiten eine Gleichung zur Bestimmung der Impedanz basierend auf empirisch aus den Messungen gewonnenen Koeffizienten her und vergleichen die Ergebnisse mit alternativen, semi-empirischen Gleichungen von CUMMINGS und CHANG

aus [76], die ursprünglich für den Einsatz von Schaumstoffen in Schalldämpfern entwickelt wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass zur Beschreibung des Absorptionsvermögens von Schaumstoffen nicht allein das Modell von DELANY und BAZLEY genutzt werden kann. DUNN und DAVERN [77] stellen ebenfalls ein empirisches Modell zur Beschreibung der Impedanz von Absorptionsmaterialien auf, gehen aber von anderen Koeffizienten aus. Ihr Modell ist die Grundlage für die Untersuchungen von WU [78], in denen es für verschiedene Materialien mit unterschiedlichen Strömungswiderständen erweitert wird. Bisher wurden die Geometrie und die Ausrichtung der Fasern nicht beachtet; MECHEL [79] und ATTENBOROUGH [80, 81] greifen dies auf und entwickeln Modelle, die auch die genannten Aspekte berücksichtigen.

Bei der Herstellung von Schaumstoffen entsteht die Skelettstruktur aus dem Matrixmaterial (meistens Polyurethan) und den darin eingeschlossenen Poren. Sind alle Poren mit benachbarten Poren verbunden, wird das Material als offenzellig bezeichnet. Bei verschlossenen Porenwänden ist kein Luftaustausch mit den benachbarten Poren möglich; Schallenergie kann daher von geschlossenzelligen Schaumstoffen nicht wesentlich absorbiert werden. Mischformen existieren und lassen sich durch den Fertigungsprozess von Schaumstoffen nicht vermeiden.

JOHNSON ET AL. [34] entwickelten ein Modell, in dem erstmalig die Elastizität des Schaumstoffes berücksichtigt werden kann. Dieses Modell wurde von CHAMPOUX und ALLARD ET AL. [35, 82, 83] aufgegriffen und ebenfalls erweitert [84]. Das Modell von ALLARD und CHAMPOUX [84], auch als JCA-Modell [35] bekannt, wird vielfach als Alternative zum Delany-Bazley-Modell betrachtet, da es auch tieffrequent gültig ist. LAFARGE ET AL. [36] und PRIDE ET AL. [37] entwickelten das Modell weiter und ergänzten es um weitere Parameter (JCAL-Modell). KINO und UENO [85] entwickeln das JCA-Modell für Fasermaterialien weiter. Außerdem stellen sie eine Möglichkeit vor, das JCA-Modell für komprimierte Melaminharzschäume, einem Material mit komplett offenzelliger Matrixstruktur, zu nutzen. Dafür werden auch Erkenntnisse aus [59] genutzt.

Die auf dieser Grundlage entwickelten Modelle basieren auf der Annahme, dass die Matrixstruktur des Absorptionsmaterials starr ist und die Schallabsorption einzig durch thermische und viskose Effekte der longitudinalen Kompressionswelle der Luft in und durch die Poren zu erklären ist. Dieser Ansatz wird auch als äquivalenter Fluidansatz bezeichnet.

KINO ET AL. zeigt in den Forschungen [52], dass die Ergebnisse aus Messungen von Polyurethanschäumen mit teilweise geschlossenen Poren am besten mit denen aus Simulationen unter Verwendung eines kombinierten BIOT-JCA-Modells übereinstimmen. Sie weisen ausdrücklich darauf hin, dass die exakte Bestimmung der Materialparameter essenziell für die korrekte Absorptionsberechnung mit Modellen ist. Die Proben werden mit einem rotierenden Messer gefertigt. Dabei wird auch der Einfluss von Untermaßproben auf den Absorptionsgrad gezeigt. Auch YANG ET AL. [86] beschäftigen sich

mit der Simulation von Schäumen mit teilweise geschlossenen Poren und schlagen ein vereinfachtes Materialmodell vor.

Aktuelle Untersuchungen von DOUTRES ET AL. [87–89] basieren auf dem JCA-Modell. Es wird untersucht, welche Änderungen in der makroskopischen Schaumstoffstruktur den berechneten Schallabsorptionsgrad beeinflussen. Damit bilden diese Untersuchungen eine Sensitivitätsanalyse im Bereich Materialmodelle. Eine Veröffentlichung aus dem Bereich der Materialwissenschaften [90] zeigt, dass Materialmodelle in diesem Bereich genutzt werden und dringend weiterentwickelt werden müssen, um Absorptionseigenschaften von Schaumstoffen abzubilden. Gängige Theorien, die oft von einem homogenen Medium ausgehen, liefern bei vielen neuartigen Materialien teilweise keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Obwohl das JCA-Modell über einen weiten Frequenzbereich valide Ergebnisse liefert und durch die Implementierung in gängigen FE-Programmen Grundlage für die Auslegung zahlreicher Absorber ist [56], greifen aktuelle Forschungen wieder das BIOT-Modell auf. Diese mehrstufigen Ansätze verknüpfen die Modellierung der Matrix aus Einheitszellen mit der Beschreibung der Strömung durch diese Matrix. GIBSON und Ashby geben in [91] eine übersichtliche Einführung in das Thema sowie weitere Literaturhinweise. Forschungsergebnisse werden außerdem von PERROT ET AL. [92] und HOANG ET AL. [93] publiziert. LECLAIRE [94] und KIDNER und HANSEN [95] vergleichen bestehende Materialmodelle und gehen auf deren Entwicklung ein. Eine umfassende Studie zur Genauigkeit von Materialmodellen wurde von OLIVA und HONGISTO [96] durchgeführt.

Die Bestimmung einiger Materialparameter ist genormt. Eine umfassende Einführung in alle Materialparameter und die akustischen Modelle bieten [57]. LECLAIRE ET AL. geben eine übersichtliche Zusammenfassung in [94, 97] und greifen zudem noch aktuelle Entwicklungen auf. Der Strömungswiderstand von Proben wird nach DIN ISO 9053 [98, 99] bestimmt, auch zur direkten Bestimmung der Tortuosität [34, 82, 100] und der Porosität [101] existieren Messverfahren. Zur Bestimmung der thermischen und der viskosen Länge wird zusätzlich die komplexe Impedanz der Probe klassisch im Impedanzrohr bestimmt. Aus der Inversion des JCA-Modells und einem Optimierungsalgorithmus können anschließend beide Größen bestimmt werden [56, 102]. Dieser genetische Algorithmus wird beispielsweise von BONFIGLIO ET AL. angewendet [103]. TRAN-VAN ET AL. nutzen Algorithmen, um künstliche neuronale Netze so zu trainieren, dass Materialparameter anisotroper Materialien berechnet werden [104].

JANG ET AL. [105] nutzen REM-Scans, um mechanische Eigenschaften realer Schäume zu berechnen, indem die Mikrostruktur vermessen und in ein FE-Modell überführt und dadurch die Porosität und die charakteristischen Längen bestimmt werden können. Auch Ultraschall wird genutzt, um die Skelettstruktur zu charakterisieren und daraus die charakteristischen Längen für das in der Forschung meistens verwendete JCA-Modell zu ermitteln. Veröffentlichungen von ALLARD ET AL. [82], PANNETON und OLNY [106] sowie LECLAIRE ET AL. [97] zeigen dies.

4 Charakterisierung des verwendeten Schaumstoffmaterials

In diesem Kapitel soll das Material vorgestellt werden, an welchem die messtechnischen Untersuchungen zur Unsicherheit bei der Bestimmung des Schallabsorptionsgrades durchgeführt wurden. Naheliegend ist es, zunächst nicht die Probenfertigung oder den Messprozess in einem genormten Prozess zu hinterfragen, sondern das Ausgangsprodukt – den Schaumstoff – näher zu betrachten.

In keinem Materialmodell werden Rand- oder Zuschnittseffekte berücksichtigt. Zwar sind nach HOROSHENKOV ET AL. [11] Unterschiede zwischen Messungen in verschiedenen Laboratorien von bis zu 10 % nicht ungewöhnlich, dennoch soll durch die (zuschnitts- und einbauunabhängigen) Materialmodelle gezeigt werden, wie groß der theoretische Schallabsorptionsgrad sein kann – und dass die Ergebnisse aus den Messungen für diese Dissertation sehr gut mit den Berechnungen aus den Materialmodellen übereinstimmen. Ziel dieses Kapitels ist es also, die Messkette zu überprüfen und damit die Datenbasis der Dissertation, das heißt die Messreihe, zu verifizieren. Die aus Messungen berechneten Schallabsorptionsgradspektren sollten mit den berechneten Schallabsorptionsgradspektren aus den Materialmodellen übereinstimmen.

Das Schallabsorptionsverhalten von Schaumstoffen ist seit ZWIKKER und KOSTEN [3] Gegenstand der Forschung. Wichtig ist, dass in allen Materialmodellen nur die Impedanz als Berechnungsgröße dargestellt wird. Der Schallabsorptionsgrad kann nach Gleichung (2.6) daraus abgeleitet werden. Betrachtet werden in den Materialmodellen immer komplexe Größen. Für diese Dissertation werden die aktuell gültigen Materialmodelle kurz in Abschnitt 4.2 vorgestellt.

4.1 Eingangsparameter

Bei der Beschreibung von Schaumstoffeigenschaften wird zwischen Parametern zur Beschreibung der akustischen Eigenschaften und Parametern zur Beschreibung der mechanischen Eigenschaften unterschieden. Akustische Eigenschaften sind jene, welche die Wechselwirkung zwischen der Matrix (der Schaumstoffstruktur) und der zum Schwingen angeregten Luft beschreiben (Porosität, Strömungsresistenz, ...). Die mechanischen Parameter beschreiben die Matrixstruktur des Schaumes (E-Modul, Strukturdämpfung, ...). Bei den akustischen Eigenschaften können die Strömungsresistenz Ξ , die Porosität ϕ und das obere Frequenzlimit der Tortuosität α_∞ direkt gemessen werden. Die Porosität ϕ beschreibt das Verhältnis des schwingenden Luftvolumens zum Gesamtvolumen. Die Strömungsresistenz Ξ beschreibt den zur Probendicke relativen Strömungswiderstand. Mit steigender Strömungsresistenz steigt das Absorptionsvermögen eines Absorptionsmaterials bis zu einer bestimmten Grenze hin an. Oberhalb dieser Grenze kann der Schall nicht mehr in das Material eindringen und wird größtenteils reflektiert [9]. Gleichzeitig wird die auftreffende Schallenergie durch eine hohe Strömungsresistenz verstärkt in die Skelettstruktur des Materials geleitet und regt dort

Scherwellen an, die den Effekt der Schwingungsmodenanregung verstärken. Dieser Effekt wird als starke Kopplung zwischen Luft und Matrixstruktur bezeichnet. Das bedeutet, dass die Messung im Kundt'schen Rohr für solche Materialien unmöglich wird. Eine quantitative Grenze für dieses Phänomen wird in der Veröffentlichung nicht genannt [57]. Das obere Frequenzlimit der Tortuosität α_∞ liegt im Bereich 1,00 ... 3,00 und ist eine intrinsische Eigenschaft jeder porösen, von der Porengeometrie abhängigen Struktur. Weiterführende Erklärungen, auch zur Messung der Tortuosität, finden sich in [57]. Die Radien der Porenverbindungen kennzeichnen die charakteristische viskose Länge Λ , wohingegen der Radius einzelner Poren die charakteristische thermische Länge Λ' beschreibt. Weitere Kenngrößen sind die thermisch-statische Durchlässigkeit k'_0 in m^2 als Maß für das Verhältnis aus der dynamischen Viskosität und dem Strömungswiderstand sowie die statisch-viskose Tortuosität α_0 und die thermisch-statische Tortuosität α_0' . Die Materialparameter des verwendeten Schaumes wurden von einem externen Partner bestimmt.

Aus einer Platte des 40 mm dicken Schaumes wurden dafür fünf Prüflinge gefertigt, anhand derer die Materialkennwerte des Schaumstoffes bestimmt wurden. Jede Rundprobe wurde zweimal vermessen (das zweite Mal gedreht mit Schalleinfall von der anderen Seite). Die gemessenen Mittelwerte sind in der folgenden Tabelle 3 dargestellt:

Tabelle 3: Materialparameter des verwendeten Schaumstoffes; bestimmt anhand von Materialproben mit einer Probendicke von 40 mm

Probe	Dicke in mm	Strömungsresistanz σ in Ns/m^5	Porosität ϕ	Tortuosität α_∞	charakteristische Länge Λ in μm	viskose thermische Länge Λ' in μm	viskose charakteristische Länge $k'_0 \text{ m}^2$
Mittelwert	40,6	6900	0,98	1,33	74	166	$86 \cdot 10^{-10}$

Die mechanischen Eigenschaften wurden in Anlehnung an ISO18437-5 [107] bestimmt. Der E-Modul beträgt 148597 Pa, die Querkontraktion 0,47 und der Verlustfaktor 0,07. Die Dichte des Schaumes beträgt $22 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

4.2 Berechnungsergebnisse von Materialmodellen

Die aus der Literatur bekannten Materialmodelle wurden in MATLAB implementiert und die Materialkennwerte wurden eingesetzt. Die für den 40 mm dicken Schaum durch Messungen im Kundtschen Rohr ermittelten Schallabsorptionsgradspektren zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Berechnungen der Schallabsorptionsgradspektren mit dem JCAL-Materialmodell.

Abweichungen zwischen Modell und Messung im Bereich von etwa 930 Hz bis 1000 Hz sind auf eine nicht ideale Lagerung der Probe im Rohr zurückzuführen. Eingezeichnet sind außerdem die Rohrgrenzfrequenzen, gekennzeichnet durch die vertikalen roten Linien im Diagramm. Die Proben wurden vom externen Partner durch den Zuschnitt mithilfe eines CNC-gesteuerten Wasserstrahles gefertigt. Daher wurden für Abbildung 5 und Abbildung 7 die berechneten Absorptionsgrade aus Messungen von Proben, die mit dem gleichen Verfahren hergestellt wurden, verglichen.

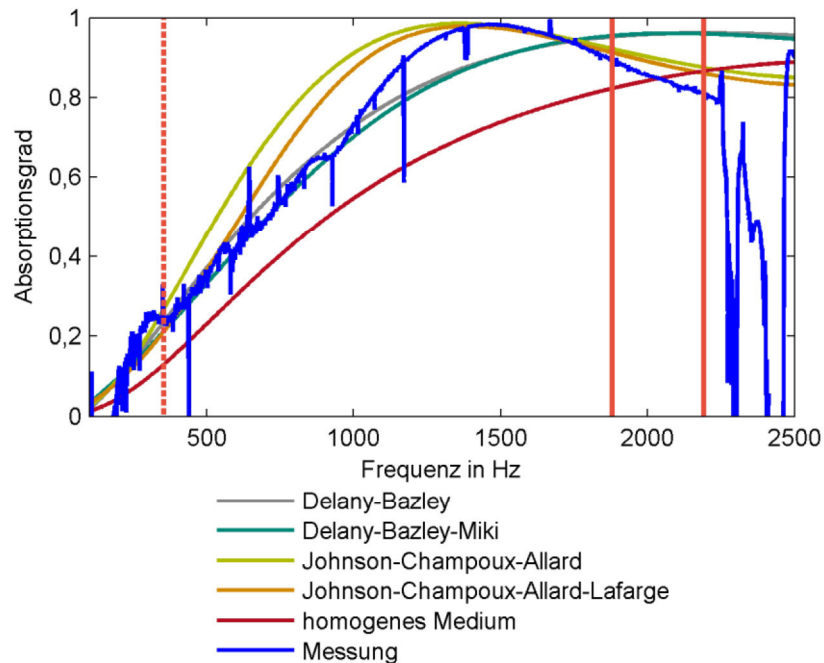


Abbildung 7: Berechnungsergebnisse verschiedener Materialmodelle für den Absorptionsgrad und berechneter Absorptionsgrad aus Messungen von Proben mit 40 mm Probendicke, extern gefertigt mit dem WSS-Verfahren

Auch Abbildung 7 zeigt, dass eine Berechnung mit dem konservativen Ansatz nach Gleichung (2.31) den Bereich, in dem das JCAL-Modell und die Messung miteinander übereinstimmen, deutlich besser eingrenzt. Die Ansätze für Fasermaterialien nach DELANY-BAZLEY [32] und DELANY-BAZLEY-MIKI [33] liefern offensichtlich, genau wie die Theorie vom homogenen Medium, für den im Rahmen der Untersuchung verwendeten PU-Schaum keine gültigen Ergebnisse.

Die Materialparameter sind dickenunabhängig. Auch bei anderen Probendicken liefern die Materialmodelle gute Übereinstimmungen von Messung und Materialmodell, wie in Abbildung 8 beispielsweise noch für 50 mm gezeigt wird.

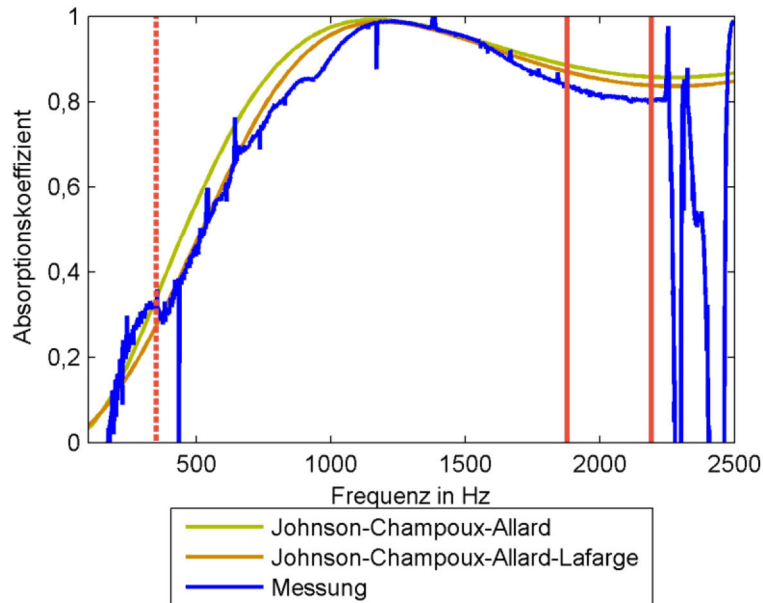


Abbildung 8: Berechnungsergebnisse verschiedener Materialmodelle für den Absorptionsgrad und berechneter Absorptionsgrad aus Messungen von Proben mit 50 mm Probendicke, gefertigt extern mit dem WSS-Verfahren

In den Diagrammen wurden Ergebnisse aus Messungen von Proben präsentiert, die mit dem Wasserstrahlzuschneitsverfahren (WSS) gefertigt wurden, da dieses Verfahren unabhängig vom Faktor Mensch ist. Auch Ergebnisse aus Messungen an Proben, die mit anderen Zuschneitsverfahren als dem WSS gefertigt worden sind, stimmen qualitativ gut mit den Berechnungsergebnissen aus dem JCA Modell überein. Die Absorptionsgrade dieser liegen im Frequenzbereich zwischen 800 Hz und 1000 Hz bis zu 8 % über den Ergebnissen von der WSS-gefertigten Probe – und weisen damit in dem Bereich eine höhere Übereinstimmung mit dem JCA- und JCAL-Modell auf. Das Maximum bei der Schallabsorption, das sich im Modell berechnen lässt, lässt sich durch die Messungen an den mit WSS gefertigten Proben sicher nachweisen.

Aus der Literatur ist die große Unsicherheit bei der Herstellung des Schaumstoffes bereits bekannt. Eine visuelle Kontrolle der Gleichheit einzelner Schaumstoffplatten (sofern als Plattenware geliefert) ist daher unbedingt erforderlich. Beispielfhaft soll hier eine Änderung der Plattendicke um 10 % gezeigt werden. In Abbildung 7 werden bereits die Berechnungsergebnisse mit den Ergebnissen aus den Messungen für die Materialdicke 40 mm verglichen. Abbildung 9 zeigt deutlich, wie sehr sich die Berechnungsergebnisse der Materialmodelle und der aus den Messungen berechneten Daten unterscheiden. Die Materialdicke wurde zur Berechnung der Materialmodelle auf 44 mm festgelegt. Das Maximum der Schallabsorption wird demnach bereits bei 1300 Hz erreicht. Auch zwischen 600 Hz und 850 Hz besteht keine Übereinstimmung mehr zwischen am JCAL Modell berechneten und aus Messungen gewonnen Spektren des Absorptionsgrades.

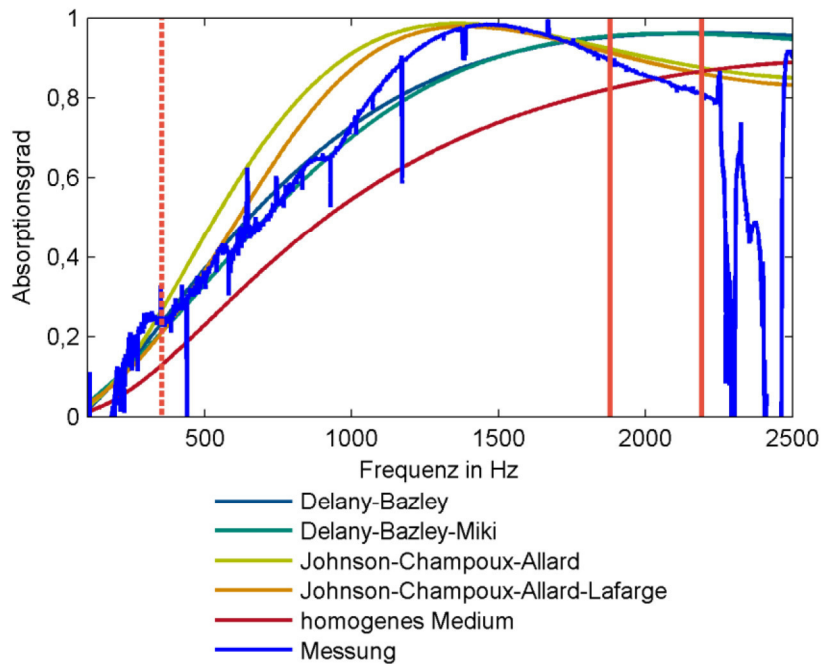


Abbildung 9: Verlauf der Absorptionsgrades bei Erhöhung der Materialdicke um 10 % in verschiedenen Materialmodellen im Vergleich zu Ergebnissen aus Messungen bei der ursprünglichen Materialdicke von 40 mm

Andere Parameter der Materialmodelle können selbstverständlich ebenso verändert werden. Bei der Herstellung der Schaumstoffe wird ein korrektes Mischungsverhältnis der Chemikalien technisch überwacht. Die Dichte der Matrix ist damit vorgegeben. Im Schäumungsprozess bei bestimmten Herstellungsverfahren hingegen können Unterschiede im Material in Abhängigkeit von der Schäumungsrichtung und dem anschließenden Zuschnitt der Plattenware entstehen [2]. Unterschiede in der Porengröße und der Strömungsresistenz wären die Folge. Plattenware desselben Materials, bei denen sich die Poren bei verschiedenen Platten gleicher Dichte visuell voneinander unterscheiden, sollten demnach nicht miteinander verglichen werden, sofern dies möglich ist. Für die messtechnischen Untersuchungen wurden jeweils mehrere Quadratmeter Schaumstoffmaterial pro Materialdicke bestellt. Bei der Probenfertigung wurde darauf geachtet visuell identisches Material zu verwenden, unter der Annahme, dass auch die Matrixstruktur identisch ist. Die vollständige chemische Überprüfung der Gleichheit aller Plattenmaterialien und auch die vollständige Überprüfung mithilfe optischer Methoden, wie Auflichtmikroskopie oder REM konnten im Rahmen der Arbeit nicht realisiert werden. Da dies auch in der Praxis nicht angewendet wird, sondern ebenfalls ein visueller Vergleich stattfindet, ist dieses Vorgehen zu rechtfertigen.

5 Gründe von Unsicherheit und methodisches Vorgehen

Die Kenntnis der Gründe von Unsicherheit hat einen erheblichen Einfluss auf die Reproduzierbarkeit von Messergebnissen und damit auf die Berechnung des Absorptionsgrades. Es ist wichtig zu verstehen, dass in dieser Arbeit zwei Betrachtungsweisen gewählt werden, um die Auswirkungen von Unsicherheit zu erfassen: detaillierte Auswertungen am Absorptionsgradspektrum und Auswertungen von diversen Einzahlwerten. In diesem Kapitel werden zunächst die Gründe untersucht und nicht beeinflussbare sowie beeinflussbare Faktoren beschrieben, die sich daraus ableiten lassen. Darauf folgt das methodische Vorgehen zur experimentellen Untersuchung der Änderung des Absorptionsgradspektrums oder der Einzahlwerte durch beeinflussbare Faktoren. Ausgewählte und betrachtete Einzahlwerte werden in diesem Kapitel ebenfalls vorgestellt.

5.1 Identifikation von Unsicherheitsquellen

Angelehnt an ein klassisches Ursache-Wirkungsdiagramm nach Ishikawa [108] lassen sich beim Kundt'schen Rohr Unsicherheitsquellen aufspüren. Das klassische Ishikawa-Diagramm unterteilt in vier Kategorien: kontrollierbare und nicht kontrollierbare Faktoren, Störfaktoren und konstante Faktoren. Die Begriffe werden hier weiter gefasst; konstante Faktoren werden den kontrollierbaren zugeordnet, weil diese beeinflussbar (=beherrschbar) sind, wenn sie bekannt sind. Störfaktoren können beides sein: kontrollierbar oder nicht kontrollierbar und sind damit nur teilweise beeinflussbar, (=teilweise) beherrschbar.

Das systematische Vorgehen erlaubt es, detailliert mögliche Schwachstellen im Prozess zu finden. An jedem Ast des Diagramms könnten weitere Detaillierungsschritte hinzugefügt werden. Zur besseren Übersicht sind in Abbildung 10 nur die Faktoren mit maßgeblichem Einfluss auf die unsicherheitsbehaftete Berechnung des Schallabsorptionsgrades, ohne weitere Details, dargestellt.

In diesem Prozess gibt es einige nicht beeinflussbare Faktoren, von denen manche allerdings kontrolliert oder verändert werden können. Andere Faktoren wiederum sind beeinflussbar. Die nicht beeinflussbaren Faktoren sind Gegenstand dieses Kapitels. Die Auswirkungen beeinflussbarer Faktoren auf Frequenzspektrum und Einzahlwerte werden in Kapitel 6 dargestellt.

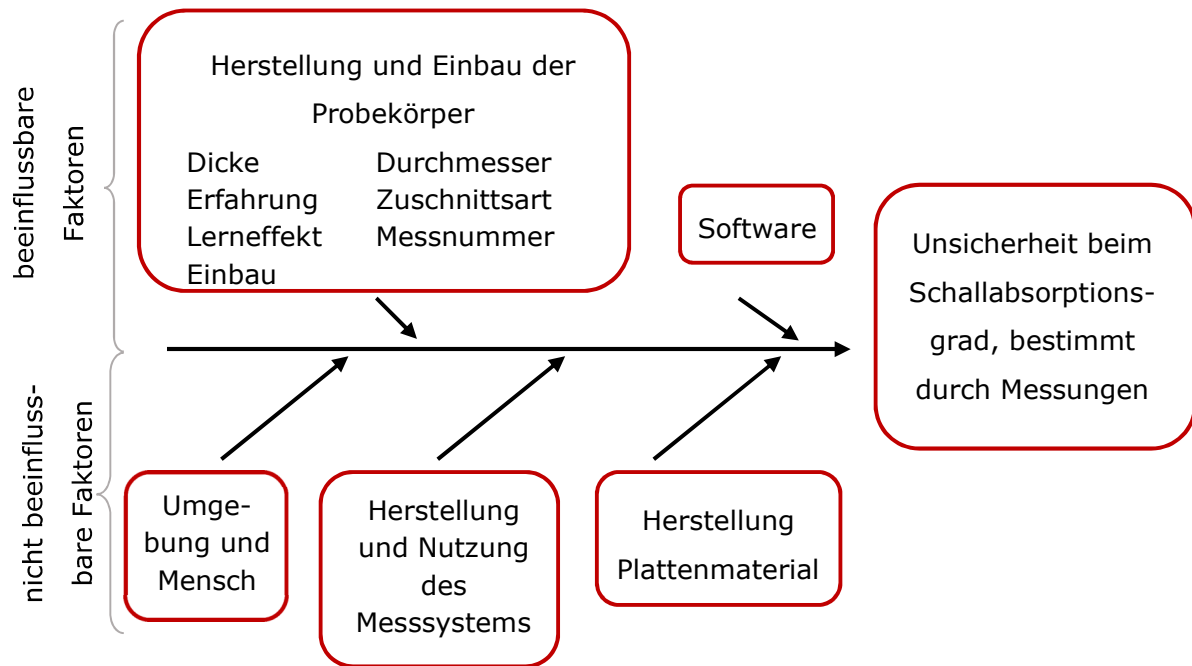


Abbildung 10: Ursache-Wirkungsdiagramm zur Darstellung der Faktoren mit maßgeblichem Einfluss auf den berechneten Schallabsorptionsgrad

Ein besonderer Fokus wurde auf die Handhabung des Messsystems gelegt. Die Unsicherheit bei der Bestimmung des Schallabsorptionsgrades wird maßgeblich bestimmt durch die Herstellung und der Einbau der Probe. Folgende Faktoren sind dabei zu betrachten: die Materialdicke, der in der Literatur kontrovers diskutierte Probendurchmesser, die Zuschnittsart und damit verbunden auch der menschliche Einfluss in der Fertigung – hier mit Erfahrung bezeichnet, der sog. Lerneffekt, verbunden mit der Frage: „unterscheidet sich der Absorptionsgrad der zuletzt gefertigten Probe einer Art von dem der ersten gefertigten Probe?“, die Messungsnummer und der Einbau des Prüflings. Voraussetzung dafür ist, dass das Vorgehen beim Einsetzen der Probe genau definiert ist. Beispielsweise kann die Probe entweder mittig-punktuell, an den Rändern punktuell oder flächig in den Probenhalter eingesetzt werden. Eine Verkippung der Probe führt dazu, dass die Probe im Rohr verspannt wird. Deshalb wurde innerhalb der Versuchsreihe darauf geachtet, die Probe flächig und ohne Verkippung in den Probenhalter einzusetzen. Die Software ist ebenfalls ein beeinflussbarer Faktor, da hier die geometrische Maße des Rohres eingetragen werden und eventuell auch Gleichungen zur Berechnung der Grenzfrequenzen angegeben werden können. Bei der Fertigung der Probe steht die Genauigkeit an erster Stelle. Dennoch ist auch die Erfahrung bei der Handhabung des Materials von Bedeutung. Wie in Abschnitt 5.4 beschrieben, kann dadurch beispielsweise ein Abrasivmittel beim Wasserstrahlzuschchnitt nicht genutzt werden.

Zu den nicht beeinflussbaren Faktoren zählt trotzdem der Mensch und die Umgebung allgemein. Es kann nicht vorausgesetzt werden, dass das Kundt'sche Rohr bei einer bestimmten Raumtemperatur genutzt wird. Die Kosten für einen klimatisierten Raum würden den Kosten und damit auch dem

einfachen Prinzip des Systems entgegenstehen. Bei vorliegenden, extern ermittelten Messdaten, kann nicht davon ausgegangen werden, dass derjenige, der die Messdaten erhoben hat, in der Benutzung des Messsystems unterwiesen war. Die Herstellung des Messsystems ist ebenfalls nicht beeinflussbar vom Endanwender, genauso wenig wie die Herstellung des Plattenmaterials. Von einer gleichbleibenden Fertigungsgüte muss hier für Messungen ausgegangen werden. Auftretende Unregelmäßigkeiten im Plattenmaterial werden durch die genormte Anzahl (drei) an Proben herausgemittelt. Die Herstellung, das Alter und damit eventuell verbundene Alterungserscheinungen des Schaumstoffes und auch des Plattenmaterials sind allerdings weder kontrollierbar noch beeinflussbar.

5.2 Nicht beeinflussbare Faktoren

Eine ebene Schallausbreitung kann nur gewährleistet werden, wenn keine Impedanzsprünge, beispielsweise durch Querschnittsänderungen, vorliegen. Potenzial für mögliche Querschnittsänderungen besteht durch die Positionierung der Mikrofone in der Rohrwandung, an der Trennfuge zwischen Messstrecke und Probenhalter und an der Rohrwandung selbst. Die Rauigkeit der Innenwandung wurde gemessen (Anhang A ab Seite 98). Eine maximale Rautiefe $R_t = 3,18 \mu\text{m}$ ist unkritisch, da die Unebenheiten erst für einen Frequenzbereich weit außerhalb des Messbereichs relevant werden. Benutzerfehler sind ebenfalls nicht beeinflussbare Faktoren. Das Messsystem sollte auf die Weise genutzt werden, die vorgesehen ist, das heißt, der Probekörper wird in den Probenhalter eingesetzt und nicht beispielsweise innerhalb der Messstrecke platziert. Zwar entspricht diese Möglichkeit des Probeneinbaus nicht der Norm, kann aber durch den technischen Aufbau des Rohres nicht verhindert werden. Einzig eine Schulung der messenden Personen kann die Möglichkeit des Falscheinbaus verhindern.

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Prozesse bei der Schaumstoffherstellung nicht vollständig kontrollierbar sind. Der Schaumstoff wird als Plattenware angeliefert, die aus einem großen Schaumstoffblock geschnitten wurde. Die Zuschnittsart wird vom Hersteller nicht veröffentlicht. Als Nutzer des Schaumstoffes ist es jedoch bedeutsam, zumindest visuell alle gelieferten Platten miteinander zu vergleichen. Durch den Herstellungsprozess kann nicht im gesamten Schaumstoffmaterial eine gleichmäßige Porengrößenverteilung gewährleistet werden. Liegen also Schaumstoffplatten vor, die sich aufgrund der Schaumstoffporengröße visuell deutlich voneinander unterscheiden, sollten diese getrennt voneinander untersucht oder das abweichende Material von der Untersuchung ausgeschlossen werden. Ebenso muss die Dicke der gelieferten Platten kontrolliert werden, denn auch hier liegen die Materialdicke teilweise außerhalb der vom Hersteller angegebenen Dickentoleranz.

Die Messumgebung blieb über den Zeitraum der Untersuchungen gleich; durch steigende Außentemperaturen erhöhte sich die Raumtemperatur um 2 K. Dies ist unkritisch, weil eine Temperaturänderung um 2 K nur zu einer Änderung der Schallgeschwindigkeit von 2 m/s führt. Außerhalb des Rohres befindet sich ein Referenzmikrofon, es werden keine Messdaten erhoben. Im Rohr selbst stieg die Temperatur über eine Dauer von 16 h durch den Dauerbetrieb des Lautsprechers ohne ein zwischenzeitliches Öffnen des Rohres um 0,1 K an. Auch dieser Effekt kann vernachlässigt werden, da eine Dauermessung nicht dem Prinzip des Kundt'schen Rohres („schnelle, kostengünstige Messung“) entspricht.

Alle Messungen wurden von derselben Person innerhalb eines kurzen Zeitraumes von drei Wochen durchgeführt, trotzdem ist der Faktor Mensch bei Messungen immer auch ein nicht beeinflussbarer Faktor. Das Vorgehen bei den Messungen wird im Folgenden detailliert beschrieben. Damit könnten die Messergebnisse mit den vorliegenden Schaumstoffproben auch an anderen Messsystemen und in anderen Forschungseinrichtungen reproduziert werden.

5.3 Beeinflussbare und kontrollierbare Faktoren am Messsystem Kundt'schen Rohr

Eine Möglichkeit, zumindest die Unsicherheit durch die Schalldruckmessungen zu kontrollieren, ist, den „Leitfaden zum Umgang mit der Unsicherheit in der Akustik und Schwingungstechnik – Teil 1: Unsicherheit akustischer Kenngrößen“ [109] zu beachten und mit der darin vorgestellten Fehlerfortpflanzung im Luftschall zu rechnen. Der Schallabsorptionsgrad wird aus Messungen des Schalldrucks berechnet. Diesen Messungen kann keine Unsicherheit zugeordnet werden, da im Datenblatt der Mikrofone Angaben zur Unsicherheit der Schalldruckbestimmung fehlen.

Einzelne Diagramme werden im Hauptteil der Dissertation zur Verdeutlichung gezeigt. Hier nicht präsentierte Grafiken sind in Anhang B ab Seite 100 hinterlegt.

An der Software und dem Kundt'schen Rohr als Hardware werden während der gesamten Messkampagne keine Änderungen vorgenommen. Die Wiederholgenauigkeit der Versuche ist beispielhaft in Abbildung B-1 auf Seite 100 gezeigt. Wie eingangs bereits erwähnt, stieg die Temperatur im Rohr kaum an. Messungen zur Berechnung der Schallabsorption bestätigen ein konstantes Verhalten der Hard- und Software (siehe Abbildung B-1 auf Seite 100).

Die Grenzfrequenzen sind in Abbildung 11 anhand eines Messergebnisses mit den drei möglichen Mikrofonabständen einer Schaumstoffprobe mit 40 mm Dicke dargestellt. Die Farben der eingezeichneten Grenzfrequenzen korrespondieren mit den berechneten Messkurven der einzelnen Mikrofonabstände. Für den Mikrofonabstand mit den zwei Mikrofonpositionen bei 59 mm und bei 180 mm sind die Grenzfrequenzen grün markiert. Die durchgezogene grüne Linie markiert dabei die aufgrund des Mikrofonabstandes errechnete obere Grenzfrequenz von 1275 Hz (Gleichung (2.32)(2.26)), die

gestrichelte Linie markiert die untere Grenzfrequenz aufgrund des Mikrofonabstandes bei 121 Hz (Gleichung (2.29)). Analog dazu sind die anderen Mikrofonabstände mit blauen und gelben Linien gekennzeichnet.

Zusätzlich sind die Grenzfrequenzen des Rohres aus den Berechnungsgleichungen nach Norm (Gleichung (2.30) und Gleichung (2.31)) bei 2191 Hz beziehungsweise 1888 Hz rot eingezeichnet (vergleiche hierzu Tabelle 1 auf Seite 23).

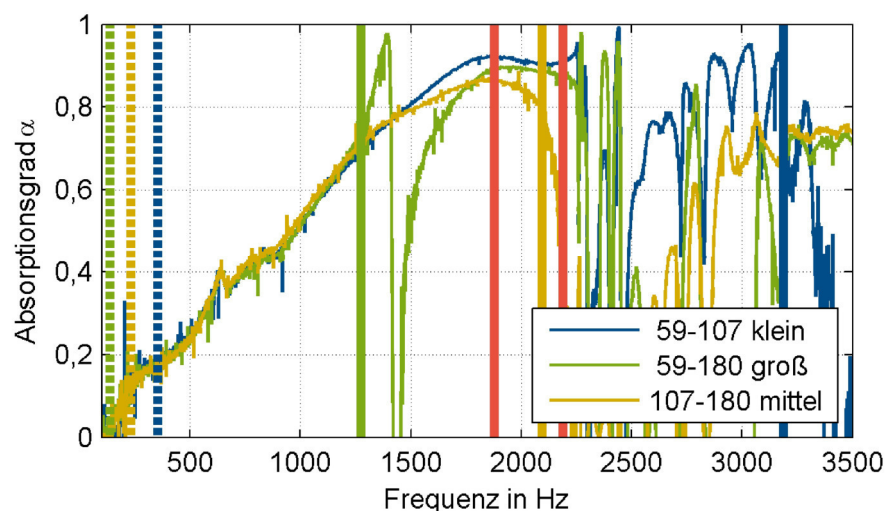


Abbildung 11: Absorptionsgrad über Frequenz mit verschiedenen Mikrofonabständen und den zugehörigen Grenzfrequenzen

Im tieffrequenten Bereich, unterhalb von etwa 250 Hz, sind alle Mikrofon-signale verrauscht. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Messergebnisse in weiten Frequenzbereichen mit allen drei Mikrofon-positionen übereinstimmen. Das bedeutet, dass die Bestimmung des Absorptionsgrades unabhängig von den gewählten Mikrofonpositionen ist. Der Absorptionsgrad steigt bei der Verwendung des größ-ten Mikrofonabstands von 121 mm (grüne Linie) oberhalb von der Grenzfrequenz 1275 Hz deutlich an. Zwischen 1395 Hz und 1430 Hz zeigt sich ein drastischer Abfall des gemessenen Absorptionsgra-des. Hier liegt eine Polstelle vor – der Abstand der Mikrofone entspricht einer halben Wellenlänge. Die Polstelle liegt außerhalb des Messbereichs (bis 1275 Hz). Der Beginn des Gültigkeitsbereichs für diesen Mikrofonabstand, ebenso wie für die beiden anderen farblich entsprechenden Mikrofonab-stände, ist mit einer gepunkteten Linie gekennzeichnet. Bis etwa 1500 Hz stimmt der gemessene Absorptionsgrad bei dem mittleren und dem kleinen Mikrofonabstand überein. Um den hochfrequenten Bereich abdecken zu können, wird der kleinste Mikrofonabstand für alle folgenden Untersuchen der Dissertation gewählt.

Wie in Abbildung 12 deutlich zu sehen ist, beeinflusst die Tiefe der Mikrofone im Rohr die Messungen kaum. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die aus den Messungen berechneten Spektren der

Absorptionsgrade bei idealer Montage (durchgezogene Linie) nicht von denen aus Messungen mit ins Rohr hineinragenden Mikrofonen unterscheiden.

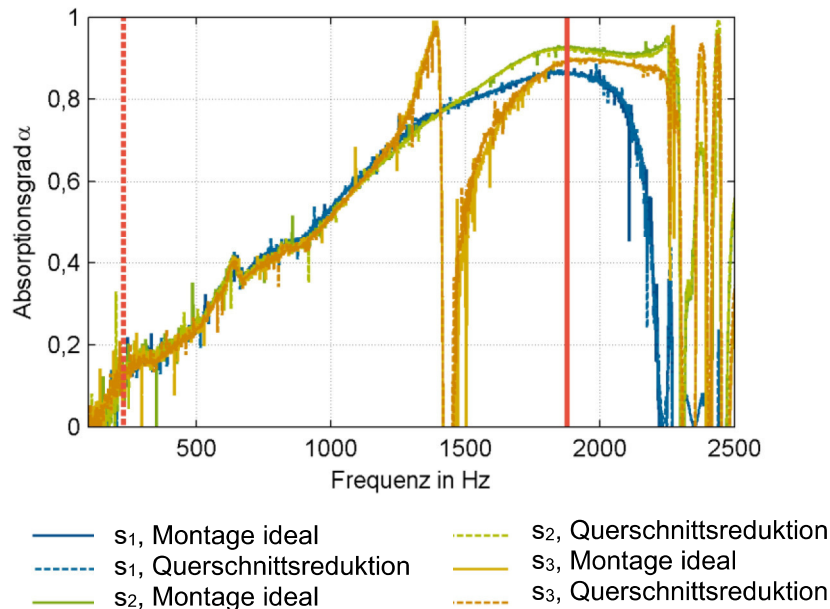


Abbildung 12: Einfluss der Mikrofontiefe auf den berechneten Absorptionsgrad bei verschiedenen Mikrofonabständen über der Frequenz

Eine bündige Montage bedeutet, dass die Mikrofone tatsächlich bündig in der Rohrwandung eingelassen sind, wie nach Norm verlangt. Dies erfordert allerdings eine Klemmvorrichtung zur Positionierung der Mikrofone. Wird diese nicht genutzt, rutschen die Mikrofone durch ihre konische Form derart in das Rohr, dass sie etwa 1 cm tief in das Rohr hineinragen. Ins Rohr hineinragende Mikrofone führen dazu, dass sich der nutzbare Innendurchmesser verkleinert und es deshalb schon bei einer tieferen Frequenz, als der anhand des Durchmessers berechneten Grenzfrequenz, zur Ausbildung von Quermoden im Rohr kommt. Dies würde im höheren Frequenzbereich durch Einbrüche im berechneten Absorptionsgrad sichtbar werden.

Für jeden Mikrofonabstand, hier gekennzeichnet durch s_1 bis s_3 , wurden jeweils Messungen mit bündig montierten und mit ins Rohr hineinragenden Mikrofonen (mit der Folge einer lokalen Querschnittsreduktion des Rohres) durchgeführt. Die bündige Messung, geplottet mit durchgezogener Linie, und die Messungen mit ins Rohr hineinragenden Mikrofonen unterscheiden sich nicht voneinander. Der Abstand 107–180 mm ist durch s_1 gekennzeichnet; s_2 kennzeichnet den Abstand 59–107 mm und s_3 den Abstand 59–180 mm. Die durchgezogene senkrechte rote Linie markiert eine obere Grenzfrequenz des Rohres bei 1888 Hz. Als Orientierung ist zusätzlich eine untere Grenzfrequenz (140 Hz aus dem Abstand s_3) mit einer unterbrochenen roten Linie dargestellt.

Nach DIN EN ISO 10534-2 ist ein Mikrofontausch vorgeschrieben. Das Ergebnis einer exemplarischen Messung (Abbildung B-4 auf Seite 101) zeigt, dass es im gültigen Messbereich des Rohres irrelevant ist, ob in der ersten Mikrofonposition oder mit vertauschten Mikrofonen – und mit in der Software angepassten Sensitivitäten – gemessen wird. Der Tausch der Mikrofone dient dazu, Phasenunterschiede zwischen den Mikrofonen herauszukürzen.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden zwei Effekte durch Drehungen nachgewiesen. Zum einen ist der Probenhalter in seiner Positionierung nicht festgelegt. Das führt dazu, dass er mit den Klammern um 360° drehbar um die Rohrlängsachse an der Messstrecke befestigt werden kann. Es konnte nicht abschließend geklärt werden, woher die Auffächerung der Kurven vom Absorptionsgrad bei einer Drehung des Probenhalters um 90° oder 180° bezogen auf die Ursprungsposition ab 1900 Hz stammt (Abbildung 13). Denkbar ist, dass sich Quermoden ausbilden. Eine Erklärung dafür konnte im Rahmen der Arbeit nicht gefunden werden. Für die Messungen zum Nachweis des Einflusses einzelner Faktoren wurde daher am Probenhalter eine Markierung angebracht, die mit einer ebenfalls auf der Messstrecke angebrachten Markierung übereinstimmen musste, sodass immer nur in genau einer definierten Position gemessen wurde.

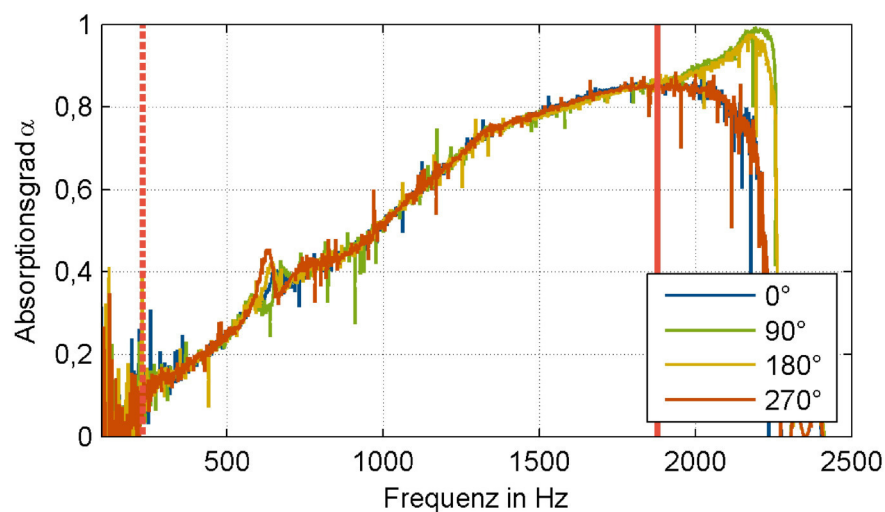


Abbildung 13: Absorptionsgrad über Frequenz in Abhängigkeit von der Positionierung des Probenhalters

Außerdem gab es einen ähnlichen Dreheffekt, wenn die Schaumstoffprobe im Rohr nach einer Messung entnommen und um 10° versetzt wieder eingesetzt und erneut vermessen wurde (Abbildung 14). In dem Diagramm sind insgesamt 36 Messungen dargestellt. Für diese Untersuchungen eignen sich besonders Proben mit einem ausgeprägten Anschnitt durch das Fertigungsverfahren, beispielsweise einer örtlich begrenzten Zunahme des Probendurchmessers, da hier schon eine fertigungsbedingte Markierung an der Probe vorhanden ist. Abbildung 17 auf Seite 55 zeigt einen beispielhaften Anschnitt durch beim Zuschnitt an der Bandsäge. Auf das Thema Probenzuschnitt wird im Abschnitt 5.4 näher eingegangen. Trotzdem liefern Proben ohne sichtbaren Anschnitt oder mit einer lokalen Verkleinerung des Durchmessers durch den Anschnitt die gleichen Ergebnisse (siehe

Abbildung B-5 auf Seite 101, Abbildung B-6 auf Seite 102). Die Probe wurde eingebaut, vermessen, ausgebaut, um 10° gedreht, wieder eingesetzt, vermessen, ausgebaut und so weiter, bis eine vollständige Drehung der Probe erfolgt war. In Abbildung 14 sind die berechneten Absorptionsgrade in drei Gruppen eingeteilt, die sich farblich unterscheiden. Die Einteilung der Gruppen ist nicht physikalisch begründet. Vielmehr soll gezeigt werden, dass, abhängig vom Verdrehwinkel der Probe und bezogen auf den Ausgangspunkt, die berechneten Absorptionsgrade ähnlich sind und die Drehung der Probe nicht zu Absorptionsgraden führt, die sich untereinander willkürlich unterscheiden. Obwohl sich die berechneten Absorptionsgrade ab 1000 Hz und insbesondere ab 1700 Hz stark voneinander unterscheiden, handelt es sich um Messergebnisse von stets derselben Probe. Die Ergebnisse deuten auf eine Inhomogenität des Materials hin. Schaumstoffhersteller selbst betonen, dass ausgelieferte Plattenware nicht homogen sein muss.

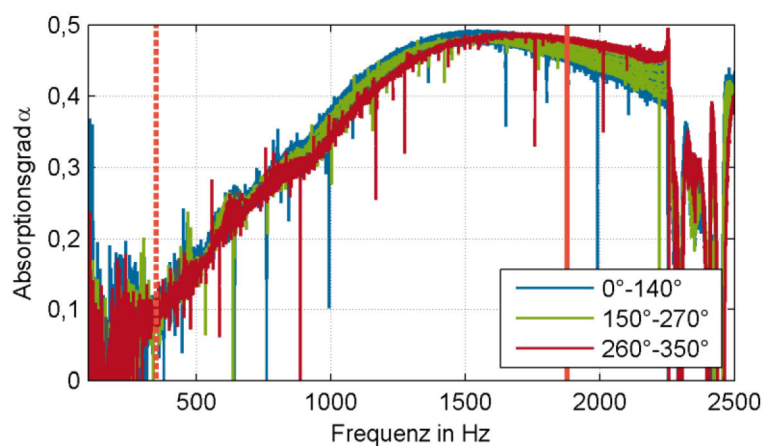


Abbildung 14: Absorptionsgrade über Frequenz in Abhängigkeit von der Drehung der Schaumstoffprobe im Probenhalter

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen über den Effekt auf das berechnete Spektrum des Absorptionsgrades durch die Drehung der Materialprobe, lassen, da die Ursache für den starken Effekt nicht geklärt werden konnte, nur den Schluss zu, im Rahmen der Untersuchungen zum Einfluss anderer Faktoren in Kapitel 6 ab Seite 65, die obere Grenzfrequenz bei 1888 Hz zu wählen, entsprechend Gleichung (2.31).

Es ist möglich, dass durch eine Justierung des Stempels auf die korrekte Probendicke ein Hohlraum hinter der Probe entsteht. Die Probe schließt an ihrer Oberseite bündig mit dem Probenhalter ab und verbleibt an dieser Position, während die Position des Stempels zur exakten Einstellung der Probendicke noch verändert werden kann. Dabei können Hohlräume zwischen Stempeloberseite und Probenunterseite entstehen. Proben mit leichtem Übermaß sind im Rohr leicht verspannt, weil der Probendurchmesser verglichen mit dem Rohrdurchmesser größer ist. Bei einer Probe mit leichtem Untermaß wird es schwieriger diesen Versuchsaufbau zu reproduzieren.

Der Effekt von Hohlräumen auf den Absorptionsgrad ist in Abbildung 15 auf Seite 51 beispielhaft an den Ergebnissen aus Messungen und Berechnungen an einer 40 mm dicken Probe eines anderen Schaumstoffes gezeigt, hinter der absichtlich ein bis zu 120 mm großer Hohlraum erzeugt wurde. Die maximale Schallabsorption wird bei der Frequenz erreicht, bei der die Probendicke identisch mit einem Abstand von $\lambda/4$ vor der schallharten Wand ist. Im Abstand von $\lambda/4$ ist die Schallschnelle maximal und damit ist auch die Wirkung des Schallabsorptionsmaterials maximal. Für die 40mm dicke Materialprobe wird entsprechend bei $f = \frac{c_0}{\lambda} = \frac{340 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{(0,04\text{m})/4} = 2125 \text{ Hz}$ das Maximum der Schallabsorption erreicht. Bedingt durch die obere Grenzfrequenz im Kundt'schen Rohr ist das Maximum der Schallabsorption bei bündiger Montage dieser Probe nicht mehr (belastbar) darstellbar. Die maximale Schallabsorption hat der Schaum bei normaler Montage im hochfrequenten Bereich, ab etwa 2000 Hz, erreicht.

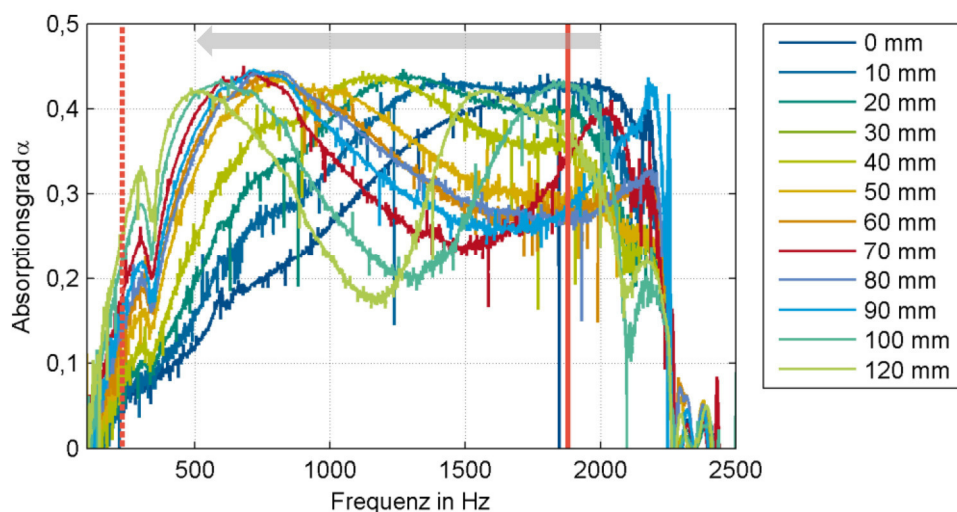


Abbildung 15: Auswirkungen von Hohlräumen hinter der Probe auf den gemessenen Absorptionsgrad

Abbildung 15 zeigt weiterhin, dass durch die geschickte Platzierung eines Schallabsorbers mit einem Abstand von $\lambda/4$ zur reflektierenden Wand eine hohe Schallabsorption auch im tieffrequenten Bereich mit geringer Materialdicke erreicht werden kann. Je größer der Wandabstand hinter der Probe, desto früher wird im Frequenzbereich das Maximum der Schallabsorption bei geringer verwendeter Materialstärke erreicht. Gekennzeichnet ist dieser Umstand in Abbildung 15 mit einem grau hinterlegten Pfeil, der die Verschiebung des Maximums von 1225 Hz auf 531 Hz, bedingt durch einen 120 mm großen Wandabstand, hervorheben soll. Der 40 mm dicke Absorber zeigt mit einem 120 mm großen Hohlraum hinter der Probe damit bei $f = \frac{c_0}{\lambda} = \frac{340 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{(0,12 \text{ m} + 0,04 \text{ m})/4} = 531 \text{ Hz}$ die maximale Schallabsorption, was in Abbildung 15 deutlich zu sehen ist.

Ein weiteres Maximum bei der Schallschnelle liegt bei $3\lambda/4$ vor: bei 1593 Hz. Auch dieses Maximum ist deutlich in der Grafik zu erkennen. Für andere Abstände hinter der Schaumstoffprobe lassen sich

die wirksamen Frequenzen entsprechend analog berechnen. Der Abstand von 70 mm hinter der Probe führt beispielsweise zu einem Maximum der Schallabsorption bei 772 Hz. Die Schallabsorption wird minimal, wenn sich der Absorber in einem Schnelleminimum befindet, nämlich bei $\lambda/2$. Im Spektrum des Absorptionsgrades für die Probe mit einem Abstand von 70 mm zur reflektierenden Rückwand ist dieser Abfall im Absorptionsvermögen bei etwa 1550 Hz deutlich zu sehen. Abbildung 15 ist damit ein gutes Beispiel für die Verwendung von Schallabsorbern in der Bauakustik, in der zum Bedämpfen tiefer Frequenzen, beispielsweise zum Einstellen der Nachhallzeit eines Raumes, Absorber mit einem bestimmten Abstand zur Wand befestigt werden.

Untersuchungen (siehe Abbildung B-3 auf Seite 101) zeigen auch, dass in einem geschlossenen Rohr ohne schallabsorbierendes Material durch Interferenzen im Rohr Schall absorbiert wird. Der Stempel war auf die maximal mögliche Probendicke, 200 mm, zurückgezogen. Wird das Rohr offen gelassen, d. h. der Probenhalter nicht montiert, kann aus den Mikrofonmessungen ebenfalls eine Schallabsorption berechnet werden. Die Schallenergie wird dabei nicht von einem Absorber aufgenommen, sondern im Labor verteilt.

5.4 Beeinflussbare und kontrollierbare Faktoren – bei der Probenherstellung

Eine Betrachtung der Probenherstellung und des Probeneinbaus nach dem Ishikawa Ansatz [108] liefert außer den aus der Literatur bekannten Faktoren Probendicke und Probendurchmesser weitere Faktoren, deren Einfluss auf das Spektrum des Absorptionsgrades und auch auf Einzahlwerte untersucht werden soll. In diesem Abschnitt werden alle Faktoren vorgestellt, deren Einfluss auf den Absorptionsgrad systematisch untersucht werden soll. Bisher vorgestellte Faktoren gelten als beeinflussbar und sind damit beherrschbar.

5.4.1 Probenzuschnitt

Die Art des Probenzuschnitts obliegt der Person, die die Messungen durchführen möchte. Die Art und damit auch die Genauigkeit des Zuschnitts der Rundproben beeinflussen den berechneten Absorptionsgrad. Abweichungen können die Qualität der Schnittkante, die Rundheit, die Geradheit, die Rechtwinkligkeit und die Zylinderform betreffen. Im Rahmen der Arbeit wurden daher aus der Literatur bekannte und aus Gesprächen ermittelte Zuschnittsverfahren zur Probenfertigung verwendet. ATALLA und PANNETON [56] verwenden für ihre Untersuchungen mit Wasserstrahl zugeschnittene Proben, BOLTON [48] hingegen verwendet ein rotierendes Messer. Auch eine Probenfertigung an

einer Bandsäge ist üblich.³ Der Hersteller des Schaumstoffes bietet einen Zuschnitt des Materials mit Hitzdraht an.⁴ Alle so bekannten Zuschnittsverfahren werden im Folgenden vorgestellt.

Hersteller für Kundt'sche Rohre bieten teilweise ein rotierendes Messer zum Einspannen in eine Standbohrmaschine an, mithilfe dessen die Materialprobe aus dem Plattenmaterial zugeschnitten werden kann (siehe Abbildung B-9 auf Seite 103). Bei weichen Schaumstoffen kann dies dazu führen, dass das Material zwar im oberen Bereich der Probe maßhaltig ist, im unteren Bereich allerdings ballig wird, also einen größeren Durchmesser aufweist. Dies liegt an der Kompression der Probe während des Zuschnitts.

Ein vom Hersteller angebotener Zuschnitt erfolgt mit Hitzdraht. Konkretere Angaben zum Zuschnittsverfahren durften vom Unternehmen nicht gemacht werden. Die Proben haben eine hohe Maßhaltigkeit, trotz einer angegebenen Zuschnittsgenauigkeit nach DIN 7715 Teil 5 P3. Demnach wären bei dem Durchmesser der Proben von 90 mm Zuschnittstoleranzen von ± 2 mm zulässig.

Beim Wasserstrahlzuschnitt besteht die Möglichkeit dem Wasserstrahl ein Abrasivmittel zur Verstärkung der Schnittkraft hinzuzufügen. Der Zuschnitt mit dem Abrasivwasserstrahl zeigte in Versuchen trotz CNC-Steuerung sowohl große Abweichungen in der Rundheit als auch eine Neigung zu einer ausgeprägten Nicht-Rechtwinkligkeit der Probe (siehe Abbildung B-10 auf Seite 103). Beim Zuschnitt wird der Wasserstrahl tangential an die auszuschneidende Kontur herangeführt und danach wieder von ihr weggeführt. Dadurch passiert der Wasserstrahl zweimal die gleiche Stelle, an der folglich mehr Material abgetragen wird. Die Probe erhält somit eine Kerbe (ebenfalls sichtbar in Abbildung B-10 auf Seite 103). Zusätzlich führt die stark ausgeprägte Nicht-Rechtwinkligkeit der Probe zu deren Verspannung im Rohr und daher zu nicht vergleichbaren und unrealistischen Ergebnissen im gemessenen Absorptionsgrad. Der Zuschnitt mit dem Abrasivwasserstrahl wird daher aufgrund der großen Fertigungsgenauigkeit nicht weiter verfolgt.

Dennoch wird insbesondere der Zuschnitt der Rundproben mit Wasserstrahl in der Industrie oft genutzt⁵. Daher werden für die Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Faktoren Probenzuschnitte mit Wasserstrahl in Auftrag gegeben. Ein Abrasivmittel wird dabei nicht verwendet. Ebenso wird die Fertigung einer rechtwinkligen Rundprobe durch eine Klemmvorrichtung zur Fixierung des Schaumstoffmaterials während des Schneidevorgangs gewährleistet. Durch die gezielte Führung des Wasserstrahls wird versucht, die Kerbe am Anschnitt zu minimieren.

³ mündliche Information von Heinrich Bietz, Physikalisch-Technische Bundesanstalt in Braunschweig auf der DAGA 2015 in Nürnberg (16.–19.03.2015).

⁴ telefonische Information von Aixfoam im Dezember 2013.

⁵ Beispiel: Röchling Automotive, Worms; Kontakt mit Carsten Riewe, Dr. Klaus Pfaffelhuber, Dirk Montan.

Preiswert ist der Zuschnitt mit einer Bandsäge. Hierbei wird eine dem Probendurchmesser entsprechende Metallscheibe auf den Schaumstoff gelegt und an der Bandsäge entlanggeführt. Dabei kann es passieren, dass das Material vom Sägeblatt weggezogen wird, wodurch eine Nicht-Rechtwinkligkeit der Probe entsteht. Möglich sind aus dem gleichen Grund auch Abweichungen von der Rundheit der Probe. Deshalb wurde für diese Arbeit ein Probenhalter (siehe Abbildung B-11 auf Seite 103) konzipiert, der mit Hilfe einer Pratze auf dem Werk Tisch der Säge befestigt wird. Zwischen zwei drehbar gelagerten Führungsscheiben wird das Material an der Bandsäge entlanggeführt und dabei nicht komprimiert. Die Möglichkeit der Rundheitsabweichung oder der Nicht-Rechtwinkligkeit wird dadurch ausgeschlossen. Allerdings führt der enge Kontakt zwischen der Führungsscheibe und dem Sägeblatt dazu, dass die Führungsscheiben öfter getauscht werden müssen, um die Maßhaltigkeit zu gewährleisten. An der Bandsäge besteht die Möglichkeit, verschiedene Motorausgangsdrehzahlen und damit verschiedene Schnittgeschwindigkeiten einzustellen. Ein langsamer Zuschnitt führt zu einem Mitreißen des Materials und dadurch zu einer uneben aussehenden Schnittfläche. Damit der Einfluss der Schnittkantenqualität berücksichtigt werden kann, wird entweder die maximale Drehzahl des Motors der Bandsäge von $1500 \frac{1}{\text{min}}$ oder eine reduzierte Drehzahl von $102 \frac{1}{\text{min}}$ genutzt. Die Schnittgeschwindigkeit kann nicht angegeben werden, weil Konstruktionsdaten der Maschine nicht mehr vorliegen und damit keine Angaben für die Berechnung vorhanden sind.

Abbildung 16 zeigt deutlich, wie sehr sich die Schnittflächen voneinander unterscheiden können: Links im Bild ist die Schnittfläche eines Zuschnitts mit einer langsam laufenden Bandsäge, rechts im Bild ist eine Schnittfläche einer mit Wasserstrahl zugeschnittenen Probe abgebildet.

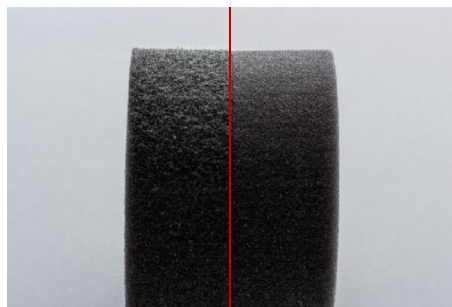


Abbildung 16: verschiedene Schnittflächen durch verschiedene Zuschnittsverfahren (links: Bandsäge, rechts: Wasserstrahl) [Bild: Fraunhofer LBF]

Wie beim Wasserstrahlzuschnitt kann es beim Zuschnitt an der Bandsäge zu Rundheitsabweichungen kommen (Abbildung 17). Dies ist stark abhängig von der Erfahrung der Person, die die Proben zuschneidet.

5.4.2 Person für den Probenzuschnitt

Für die experimentelle Untersuchung werden von drei verschiedenen Personen jeweils drei Proben gefertigt. Damit wird zum einen erfasst, ob es einen Lerneffekt beim Zuschnitt gibt, zum anderen

wird der Forderung aus der Norm Rechnung getragen, dass immer jeweils drei unabhängige Prüflinge vermessen werden sollen. Die drei Personen haben ein unterschiedliches Maß an Erfahrung beim Zuschnitt an der Bandsäge: Person A, ein Werkstattmeister, verfügt über die größte Erfahrung bei der Fertigung der Prüflinge. Person B hat Erfahrung im Umgang mit der Bandsäge, da sie diese für seine Nebentätigkeit im Instrumentenbau regelmäßig nutzt. Es zeigt sich aber, dass die von dieser Person gefertigten Prüflinge sich deutlich von den beiden anderen unterscheiden. Person C verfügt über eine Ausbildung zum Industriemechaniker. Die Zuschnitte ähneln denen von Person A. Visuell deutlich zu erkennen ist eine kleine lokale Überhöhung an der Probe an der Stelle des Anschnitts. Bei Person A und C ist dies nur bei ganz wenigen Proben zu sehen, bei Person B häufig.



Abbildung 17: möglicher ausgeprägter Anschnitt mit Ausprägung einer Überhöhung beim Sägezuschnitt
[Bild: Fraunhofer LBF]

Zusätzlich werden Proben von externen Dienstleistern gefertigt. Der Zuschnitt von Rundproben mit Hitzdraht wird noch vom Hersteller des Plattenmaterials übernommen. Die Fertigung der Proben mit Wasserstrahl übernimmt ein Unternehmen, welches bereits Erfahrung im Zuschnitt von Schaumstoff mit Wasserstrahl hat.

5.4.3 Probendurchmesser

In der Literatur herrscht, wie in Kapitel 3 beschrieben, Uneinigkeit über den empfehlenswerten Probendurchmesser. Der Innendurchmesser des Kundt'schen Rohres am Fachgebiet SAM beträgt 90 mm. Für die Untersuchungen wurden Proben mit 89 mm, 90 mm und 91 mm zugeschnitten. Damit sind einerseits Proben mit einem leicht größeren oder kleineren Durchmesser ($\pm 1\%$) oder mit einer Abweichung von etwa 1 mm erfasst. Andererseits werden durch die Wahl dieser drei Durchmesser typische Abweichungen, beispielsweise durch Zuschnittsungenauigkeiten, berücksichtigt: unter anderem die Fertigungsgenauigkeit eines Freihandschnittes, bei dem die Kontur der Probe auf den Schaumstoff aufgezeichnet und ohne speziellen Probenhalter ausgeschnitten wird. Mit dem rotierenden Messer können keine unterschiedlichen Durchmesser realisiert werden. Ausschließlich Zuschnitte mit einem Durchmesser von 90 mm können damit gefertigt werden.

5.4.4 Montagerichtung

Da der schallharte Abschluss des Rohres ein beweglicher Stempel ist, kann dieser entweder vor dem Einsetzen der Materialprobe auf die entsprechende Probendicke und damit Messposition eingestellt werden oder erst weit zurückgezogen und zusammen mit der Materialprobe auf die Messposition verfahren werden. Diese beiden Einbaumöglichkeiten können zu geringen Unterschieden bei den gemessenen Absorptionsgraden führen (siehe Abbildung B-7 auf Seite 102). Da es diese zwei Montagearten gibt, besteht vor allem bei der Möglichkeit, die Probe gemeinsam mit dem Stempel zu positionieren, die Wahrscheinlichkeit, dass der Stempel noch einmal zurückgezogen und wieder nach oben verschoben wird, um das korrekte Probendickenmaß einzustellen. Vorstellbar ist, dass durch diesen Prozess Kompressionen im unteren Teil der Probe gelöst werden, die sich durch das gemeinsame Verschieben von Stempel und Probe ergeben haben. Wie in Abbildung B-8 auf Seite 102 beispielhaft ersichtlich ist, führt dieser Vorgang nicht zu einer Änderung des gemessenen Absorptionsgrades.

5.4.5 Probennummer und Messungsnummer

In der DIN EN ISO 10534-2 wird gefordert, mehrere Materialproben zum Einsetzen in das Rohr zu fertigen. Abgeleitet aus der Anforderung in der Norm wird in dieser Dissertation untersucht, ob es einen „Lerneffekt“ bei der Probenfertigung gibt und sich die Absorptionsgrade der zuerst gefertigten Probe von dem der zuletzt gefertigten Probe unterscheiden. Jede Probe wird dreimal in das Kundt'sche Rohr eingebaut und vermessen. Diese Größe dient zur Sicherstellung der Wiederholbarkeit.

5.4.6 Zusammenfassung

Tabelle 4 fasst alle in dieser Arbeit untersuchten Möglichkeiten des Zuschnitts zusammen. Mit den verwendeten vier Materialstärken, anhand derer gezeigt werden soll, ob es Effekte gibt, die sich verstärkt an dünnen oder dicken Materialproben zeigen, ergibt sich eine Gesamtprobenzahl von 516 Stück. Alle Proben wurden gekennzeichnet und können somit jedem Fertigungsverfahren exakt zugeordnet werden. In dieser Arbeit gelten die folgenden Bezeichnungen:

- SSH: Sägezuschnitt, hohe Motordrehzahl an der Bandsäge, handgeführte Probe
- SSF: Sägezuschnitt, hohe Motordrehzahl an der Bandsäge, Verwendung der Probenführung
- SLH: Sägezuschnitt, geringe Motordrehzahl an der Bandsäge, handgeführte Probe
- SLF: Sägezuschnitt, geringe Motordrehzahl an der Bandsäge, Verwendung der Probenführung

-
- HZD: Zuschnitt mit Hitzdraht
 - MES: Zuschnitt mit dem rotierenden Messer
 - WSS: Wasserstrahlzuschnitt ohne Abrasivmittel

Tabelle 4: Zusammenfassung der Möglichkeiten für die Fertigung von Prüflingen

Zuschnitt	Durchmesser in mm	Anzahl je Durchmesser	Personen für Zuschnitt	Probendicke in mm
Bandsäge, Freihand, 102 1/min	89; 90; 91	3	3	20; 30; 40; 80
Bandsäge, Freihand, 1500 1/min				
Bandsäge, Führung, 102 1/min				
Bandsäge, Führung, 1500 1/min				
Messer	90	3	1	20; 30; 40; 80
Hitzdraht	89; 90; 91	3	1	20; 30; 40; 80
Wasserstrahlzuschnitt	89; 90; 91	3	1	20; 30; 40; 80

5.5 Methodisches Vorgehen mithilfe der statistischen Versuchsplanung

Ideal wäre es, für die Untersuchungen in dieser Dissertation einen vollständigen, vollfaktoriellen Versuchsplan nutzen zu können. Der Versuchsaufwand bei vollfaktoriellen Versuchsplänen n_r ergibt sich aus der Anzahl der Faktoren n_f und der Anzahl der Faktorstufen n_l

$$n_r = n_l^{n_f}. \quad (5.1)$$

Der Versuchsraum ist siebendimensional (Probendicke, Durchmesser, Zuschnittsart, Einbaurichtung, Person für die Fertigung, Zuschnitt, Messung). In dem vorliegenden Versuchsaufbau werden mehr als drei Faktoren untersucht, weshalb eine klassische grafische Darstellung des Versuchswürfels nicht mehr möglich ist. Jeder Faktor hat mindestens zwei (Einbaurichtung) und maximal sieben Faktorstufen (Fertigungsverfahren). Die Faktorstufen müssen gezielt gewählt werden, um eine statistische Auswertung mit einer Varianzanalyse zu ermöglichen. Ist der Abstand zwischen den Faktorstufen nicht groß genug gewählt, wird die Varianzanalyse keine signifikanten Ergebnisse hervorbringen. Die Varianzanalyse ist Gegenstand von Kapitel 6.

Für diese Dissertation *kann* kein einzelner, vollständiger, vollfaktorieller Versuchsplan erstellt werden, weil kein rotierendes Messer mit einem anderen Durchmesser als dem Rohrdurchmesser zur Verfügung stand. Außerdem kann nicht jedes Fertigungsverfahren von jeder fertigenden Person angewendet werden. Besonders die automatisierten Fertigungsverfahren wie das Wasserstrahlschneiden und der Zuschnitt mit Hitzdraht sind systembedingt unabhängig von der fertigenden Person – sofern die Maschine korrekt justiert wird. Ein teilfaktorieller Plan liegt jedoch ebenfalls nicht vor, da alle praktisch möglichen Faktorstufen der Faktoren geprüft werden. Es stehen demzufolge mehrere vollfaktorielle Versuchspläne zur Verfügung, die sich je nach Auswahl der Faktoren unterscheiden. Tabelle 5 fasst alle Faktoren und Faktorstufen zusammen und zeigt damit, wie sich diese Zahl

zusammensetzt. Die Anzahlen der Faktorstufen werden miteinander multipliziert, um die mögliche Anzahl der Kombinationen zu ermitteln.

Tabelle 5: Faktoren und Faktorstufen für Versuchspläne

		Dicke in mm	Durchmesser in mm	Zuschnittsart	Einbaurichtung	Personen	Zuschnitt	Messung	Gesamtanzahl
Sägezuschnitte	Faktorstufen	30, 40, 50, 80	89, 90, 91	SSH, SLH, SSF, SLF	o, u	A, B, C	1, 2, 3	x, y, z	
		4	3	4	2	3	3	3	2592
Messerzuschnitte	Faktorstufen	30, 40, 50, 80	90	MES	o, u	A	1, 2, 3	x, y, z	
		4	1	1	2	1	3	3	72
Wasserstrahlzuschnitt	Faktorstufen	30, 40, 50, 80	89, 90, 91	WSS	o, u	Extern	1, 2, 3	x, y, z	
		4	3	1	2	1	3	3	216
Hitzdrahtzuschnitt	Faktorstufen	30, 40, 50, 80	89, 90, 91	HZD	o, u	Extern	1, 2, 3	x, y, z	
		4	3	1	2	1	3	3	216

Die Einbaurichtung, gekennzeichnet in Tabelle 5, mit „o“ und „u“ steht für die zwei Möglichkeiten, die Probe im Probenhalter zu platzieren, wie in Abschnitt 5.4 beschrieben. Die Wahl der Faktorstufen beim Faktor Dicke ist fertigungsbedingt seitens Hersteller des Plattenmaterials. Durch die ausgewählten Materialdicken werden sowohl geringe als auch hohe Materialien im Versuchsplan beachtet. Die Durchmesser wurden so gewählt, dass der Innendurchmesser des Rohres von 90 mm und sowohl Proben mit einem Übermaß von 1 % als auch Proben mit einem Untermaß von 1 % realisiert wurden. Die Übermaß-/Untermaßproben bilden damit den Bereich der Literatur ab, in dem Uneinigkeit besteht: die Größe der Probe im Rohr. Die Abweichung von 1 % wird ebenfalls in der Literatur genannt. Mit der Wahl von drei Personen für die Sägezuschnitte werden die verschiedenen Erfahrungslevel bei der Probenfertigung abgedeckt. Ein Mehrwert durch weitere Personen für den Zuschnitt wäre nicht gegeben. Pro Zuschnittsvariante, Durchmesser, Person und Probendicke werden drei Prüflinge angefertigt und jeder Prüfling wird dreimal vermessen. Insgesamt ergeben sich damit 3096 Messungen.

5.6 Mittelungen von Absorptionsgradspektren

Die Verwendung von Mittelungen ist ein zentraler Kern dieser Dissertation. Wie in der Versuchsplannung beschrieben, liegen 3096 aus Messungen berechnete Absorptionsgradspektren vor. Diese alle einzeln visuell miteinander zu vergleichen, um den Einfluss eines Faktors zu identifizieren und daraus allgemeingültige Schlüsse zu ziehen, ist unmöglich. Andererseits erlaubt die Datenbasis statistisch abgesicherte Ergebnisse darüber, ob und wie stark ein Faktor den Absorptionsgrad beeinflusst. Durch die Mittelungen sollen also globale Aussagen darüber getroffen werden, welche Einflussfaktoren den gemessenen Absorptionsgrad auf welche Weise beeinflussen.

Jedem einzelnen berechneten Absorptionsgradspektrum liegen drei Absorptionsgradspektren zugrunde, die aus drei manuell gestarteten Messungen bestimmt wurden. Jedem dieser drei Absorptionsgradspektren liegen wiederum drei bereits während des Messprozesses programmintern berechnete und gemittelte Absorptionsgradspektren zugrunde. Für jede der 516 Proben ergeben sich damit neun Mittelungen aus den berechneten Absorptionsgradspektren.

Alle Messungen werden arithmetisch gemittelt. In der Berechnungsvorschrift [45] der Korrekturfunktion des Phasenunterschiedes zwischen den Mikrofonen laut DIN EN ISO 10534-2 wird die geometrische Mittelung verwendet. Durch die geometrische Mittelung wird die berechnete Korrekturfunktion geglättet, weil zwischen den einzelnen Frequenzstützstellen gemittelt wird. Bei der arithmetischen Mittelung der einzelnen Absorptionsgradverläufe wird bei jeder Frequenzstützstelle die jeweilige Anzahl Messungen addiert und durch die Anzahl der betrachteten Messpunkte geteilt. Die Berechnungsgleichung dafür lautet:

$$\bar{x}_{arith} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.2)$$

Abhängig von der zu überprüfenden Hypothese ist es möglich, dass viele Absorptionsgradspektren oder daraus ermittelte Einzahlwerte gemittelt werden müssen, beispielsweise wenn die Hypothese geprüft werden soll, dass der Faktor Probendicke einen Einfluss auf den berechneten Absorptionsgrad hat. Bei dieser Fragestellung werden pro Probendicke für den 90 mm Durchmesser 270 Absorptionsgradspektren frequenzweise gemittelt. Diese Zahl setzt sich zusammen aus der Multiplikation von vier möglichen Sägeverfahren, drei Personen, drei Zuschnitten, drei Messungen, zwei Einbaumöglichkeiten, addiert mit der Multiplikation aus drei externen Fertigungsverfahren, einer Person, drei Zuschnitten, drei Messungen und zwei Montagerichtungen. Für die Auswertung hinsichtlich des Einflusses der Person, welche die Proben fertigt, werden nur 72 Messungen pro Probendicke miteinander gemittelt, berechnet aus vier möglichen Fertigungsarten (SSH, SLH, SSF, SLF), multipliziert mit zwei möglichen Montagerichtungen (o/u), drei Probennummern und drei Messungsnummern. Wird der Durchmesser nicht gesondert betrachtet, ergeben sich demzufolge 216 Mittelungen pro

Probendicke. Durch die Darstellung des Absorptionsgrades über der Frequenz sind auch Detailbetrachtungen in bestimmten Frequenzbereichen möglich. Auf die Darstellung der Standardabweichung wird bei der Auswertung der Absorptionsgradspektren zugunsten der Lesbarkeit der Diagramme verzichtet. Die Varianzanalyse anhand der Einzahlwerte greift das Maß aber auf, wodurch kein Informationsverlust entsteht.

5.7 Festlegung von Zielgrößen für die Untersuchungen des Einflusses verschiedener Faktoren auf Einzahlwerte

Eine Herausforderung besteht darin, Einzahlwerte als Zielgrößen zu definieren, weil nur so eine statistische Auswertung erfolgen kann. Der Absorptionsgrad ist frequenzabhängig. Daher gilt es, aus dem frequenzabhängigen Verlauf einen Einzahlwert zu ermitteln. Aufbauend auf dieser Zielgröße wird die Varianzanalyse berechnet, mithilfe derer die Signifikanz eines Faktors festgestellt werden kann.

Bei allen Auswertungen zur Statistik ist die Zielgröße ein **Einzahlwert**. DIETRICH [110] hat in seiner Arbeit erste Vorschläge erarbeitet und die Methode der Sensitivitätsanalyse als Analysewerkzeug in der Akustik anhand einer Versuchsreihe geprüft.

Als Zielgrößen schlägt er vor:

- A_α : die Fläche unter dem berechneten Absorptionsgrad; entspricht der Summe aller berechneten Einzelabsorptionsgrade im betrachteten Frequenzbereich
- Unterteilung der Fläche in n Einzelbereiche $A_{\alpha 1}$ bis $A_{\alpha \dots n}$, um diese gezielt miteinander vergleichen oder gewichtet addieren zu können.

Nach DIN EN ISO 11654 [111] lässt sich der Schallabsorptionsgrad als Kennzahl entweder als Darstellung aus Terz- oder Oktavbändern sowie als bewerteter Schallabsorptionsgrad α_w darstellen. Die ersten beiden Möglichkeiten erinnern an die Idee von DIETRICH, den Verlauf des Absorptionsgrades in Einzelflächen zu unterteilen. Allerdings gelten hier festgelegte Frequenzbänder und keine selbstgewählten Grenzen. Zur Ermittlung des Terz- und Oktavspektrums des Absorptionsgrades werden die einzelnen pro Frequenzstützstelle berechneten Absorptionsgrade addiert und arithmetisch gemittelt. Der berechnete Wert wird bei der Terzmittenfrequenz aufgetragen. Mit der Berechnung eines Mittelwerts unterscheiden sich die so erzeugten Kennzahlen von den in der Akustik sonst üblich verwendeten Terz- und Oktavwerten, die eine energetische Aufsummierung einzelner Werte darstellen. Die Frequenzgrenzen sind aber die gleichen wie in der Darstellung des klassischen Terz- oder Oktavspektrums. Beispielhaft werden zwei berechnete Spektren des Absorptionsgrades in Abbildung C-1 auf Seite 143 (Terzspektrum) und Abbildung C-2 auf Seite 143 (Oktavspektrum) gezeigt. Es ist klar ersichtlich, dass hierbei zwar die Vielzahl der Werte auf wenige reduziert wurde, aber trotzdem

kein Einzahlwert zur Verfügung steht. Die Werte α_s und α_p kennzeichnen die Schmalbandkennzahlen des berechneten Terz- beziehungsweise des Oktavspektrums.

Ein Einzahlwert wird in der DIN EN ISO 11654 vorgeschlagen, in Form des bewerteten Schallabsorptionsgrades α_w . Zur Ermittlung dieses Einzahlwertes wird eine in der Norm angegebene Bezugskurve iterativ um 0,05 abgesenkt, bis die summierten Unterschreitungen zu α_p kleiner gleich 0,1 sind. Der bewertete Schallabsorptionsgrad wird an der Bezugskurve (!) bei 500 Hz abgelesen. Ist der Absorptionsgrad des Oktavspektrums an einer oder mehreren Stellen 0,25 höher als die abgesenkte Bezugskurve, wird dies mit einem zusätzlichen Index bei α_w gekennzeichnet. Ein L kennzeichnet Überschreitungen im tieffrequenten Bereich unterhalb von 500 Hz, ein H Überschreitungen im hochfrequenten Bereich oberhalb von 1000 Hz, ein M Überschreitungen im mittleren Frequenzbereich. Der bewertete Schallabsorptionsgrad ist besonders in der Raum- und Bauakustik ein gern genutztes und verbreitetes Maß. Oft werden Schallabsorptionsmaterialien dort zur Verwendung mit α_w gekennzeichnet und erlauben es dadurch, verschiedene Materialien direkt miteinander zu vergleichen. Da in der Raumakustik ohnehin eher über einen weiten Frequenzbereich die akustische Situation beeinflusst werden soll, ist eine schmalbandige Angabe des Absorptionsgrades nur selten nützlich, nämlich bei der gezielten Bedämpfung von Raummoden. Raummoden werden allerdings baulich, wenn möglich, vermieden, oder durch Plattenabsorber oder Helmholtzresonatoren bedämpft. Näheres zur Auslegung poröser Absorber in der Bauakustik sowie von Plattenresonatoren findet sich in Anhang D ab Seite 165.

Einzelne von DIETRICH [110] und in der DIN EN ISO 11654 [111] vorgeschlagene Zielgrößen können in leicht veränderter Form als Zielgrößen für die Berechnung der Varianzanalyse verwendet werden. Unterschiedliche Verläufe der Absorptionsgrade können durch keine Einzahlwert-Zielgröße abgebildet werden. Verschieden aussehende Absorptionsgradverläufe können gleiche Flächensummen ergeben, wobei der Einfluss eines Faktors auf einen bestimmten Frequenzbereich in der Varianzanalyse nicht mehr genau differenziert werden kann. Eine manuelle Gewichtung einzelner Frequenzbereiche ist nicht empfehlenswert, da hier ein allgemeingültiges Verfahren vorgestellt werden soll. Für verschieden dicke Proben müssten die Gewichtungsfaktoren abhängig von noch zu definierenden Merkmalen im Absorptionsgradverlauf definiert werden. Kritisch sind ebenfalls die Kennzahlen α_s , α_p und α_w zu betrachten: α_s und α_p sind keine Einzahlwerte und scheiden schon aus diesem Grund aus. Durch die zusätzliche Kennzeichnung mit den Buchstaben ist die Zielgröße α_w nach DIN EN ISO 11654 ungeeignet. Dennoch wird sie aufgrund der großen Bekanntheit in der Industrie und der Architektur für die Auswertung dieser Dissertation als Zielgröße genutzt. Kommerzielle Anbieter von Schallabsorptionsmaterialien verzichten gelegentlich sogar auf die zusätzliche Kennzeichnung.

Eine Zielgröße mit akustischem Bezug kann demnach, abgesehen von α_w mit den bekannten Schwächen, nicht gefunden werden. Demzufolge werden zusätzlich Kennzahlen aus der Statistik gesucht, um allgemein das Verhalten eines Kurvenverlaufs zu beschreiben. Es werden Kenngrößen der deskriptiven Statistik vorgestellt, um abstrakte Kenngrößen für die Beschreibung der Absorptionsgradverläufe zu erhalten. Neben der bekannten Größe Mittelwert werden die zentralen Momente der Stochastik verwendet.

- arithmetischer Mittelwert

Der arithmetische Mittelwert \bar{x}_A ((5.2)) wird aus der Summe der einzelnen Ereignisse berechnet und bezieht diese auf die Größe der Stichprobe. In der Statistik wird das arithmetische Mittel als Schätzer für Erwartungswert μ benutzt, sofern eine Normalverteilung der Daten gegeben ist.

- mittlere absolute Abweichung, Varianz, Schiefe, Wölbung

Die zentralen Momente der Statistik sind Kenngrößen, um die Verteilung der Datenmenge zu beschreiben, wobei auf die Normalverteilung referenziert wird. Dazu gehören die mittlere absolute Abweichung (*mean deviation*) MD, die Varianz s^2 , die Schiefe und die Wölbung. Bei der mittleren absoluten Abweichung wird die Abweichung vom Mittelwert betragsmäßig erfasst, wohingegen die Varianz s^2 die mittleren quadratischen Abweichungen berücksichtigt. Ist eine Normalverteilung nicht gegeben, können Momente der Statistik zwar berechnet werden, die gewonnenen Daten sind dann allerdings kritischer zu interpretieren.

Das zentrale Moment erster Ordnung ist immer Null, weil der Erwartungswert dem Einzelereignis der Stichprobe entspricht. Schiefe und Wölbung (= Kurtosis) werden mithilfe des zentralen Moments dritter beziehungsweise vierter Ordnung berechnet und beschreiben die Symmetrie der Wahrscheinlichkeitsverteilung zum arithmetischen Mittelwert beziehungsweise die Krümmung einer Kurve näher. Schiefe und Varianz werden auf die dritte beziehungsweise vierte Potenz der Standardabweichung bezogen. Ist die Schiefe < 0 , wird die Verteilung der Einzelereignisse x_i als rechtsschief bezeichnet, ein Wert der Schiefe > 0 deutet auf eine linksschiefe Verteilung der Einzelereignisse x_i hin. Durch die dritte Potenz werden die Absorptionsgrade der höheren Frequenzen besonders stark gewichtet [25, 28]. Bei normalverteilten Werten sind sowohl Wölbung als auch Schiefe gleich 0.

mittlere absolute Abweichung

(Moment 1. Ordnung):

$$MD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}| \quad (5.3)$$

Varianz

(Moment 2. Ordnung):

$$s^2 = VAR_A = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (5.4)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Schiefe} & \\ \text{(Moment 3. Ordnung):} & \text{Schiefe} = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\sqrt{\left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2\right)^3}} \end{array} \quad (5.5)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Wölbung} & \\ \text{(Moment 4. Ordnung):} & \text{Kurtosis} = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\sqrt{\left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2\right)^4}} \end{array} \quad (5.6)$$

In den Gleichungen zur Berechnung der Schiefe und Wölbung wird die arithmetische Standardabweichung, die Wurzel aus der Varianz, verwendet. Die Standardabweichung gibt die Streuung der Daten vom Mittelwert an ((5.7)) und ist eine der bekanntesten Größen der Statistik.

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.7)$$

Die Verwendung höherer Momente führt *nicht* dazu, dass genauere Aussagen über Auswirkungen auf den Absorptionsgrad getroffen werden: Es handelt sich lediglich um, mathematisch gesehen, andere Kennzahlen zur Beschreibung der Verteilungen. Das kann jedoch dazu führen, dass schwach signifikante Effekte bei einer Zielgröße signifikant, bei einer anderen nicht signifikant erscheinen. Die starken Signifikanzen bleiben immer bestehen.

Das Ziel der Untersuchung ist es, Faktoren mit signifikantem Einfluss auf den Absorptionsgrad zu finden. Die Zielgrößen sollen daher für viele Messungen – unabhängig von dem alles dominierenden Faktor Probendicke und unabhängig vom Gültigkeitsbereich des Kundt'schen Rohres – gültig sein. Andere denkbare Zielgrößen wie der maximale Absorptionsgrad in einer Messung, die größte Änderung des berechneten Absorptionsgrades zwischen zwei Frequenzstützstellen oder der Absorptionsgrad an einer bestimmten Frequenz werden daher nicht betrachtet. Für die vorliegende Dissertation werden für die Auswertung die Zielgrößen arithmetischer Mittelwert, mittlere absolute Abweichung, Varianz, Schiefe, Wölbung und α_w betrachtet.

6 Auswirkungen von Änderungen einzelner Faktoren – Ergebnisse

Die Faktoren, bei denen aufgrund eigener Untersuchungen, Erkenntnissen aus der Literatur und dem systematischen Hinterfragen des Messprozesses vermutet wird, dass sie den Absorptionsgrad beeinflussen, werden mithilfe der statistischen Versuchsplanung untersucht. Dabei sollten folgende auf den Forschungsfragen basierende Hypothesen überprüft werden:

- Die Absorptionsgrade von auf unterschiedliche Weise gefertigten Proben weichen voneinander ab. Diese Abweichungen treten unabhängig von der Probendicke auf und sind bei verschiedenen Probendurchmessern unterschiedlich stark ausgeprägt.
- Die Erfahrung des Menschen bei der Probenfertigung an der Bandsäge ist ein nachweisbarer Einfluss auf den Absorptionsgrad.
- Die Absorptionsgrade der drei gefertigten Prüflinge je Durchmesser und Zuschnittsverfahren unterscheiden sich voneinander – es ist ein „Lerneffekt“ nachweisbar.
- Die Absorptionsgrade unterscheiden sich durch die verschiedenen Möglichkeiten des Einbaus der Probe im Probenhalter voneinander.

Bei der Formulierung der Hypothesen wurde darauf geachtet, das Wort „Absorptionsgrad“ zu verwenden, um zu verdeutlichen, dass damit sowohl die Absorptionsgradspektren als auch die Einzahlwerte gemeint sind. Zuerst sollen die Auswirkungen auf das Absorptionsgradspektrum dargestellt werden, anschließend die Auswirkungen auf die in Abschnitt 5.7 festgelegten Einzahlwerte.

6.1 Einfluss der Faktoren auf das Absorptionsgradspektrum

Die Diagramme auf den folgenden Seiten zeigen den berechneten Absorptionsgrad über der Frequenz. Alle Diagramme scheinen verrauscht zu sein. Eine Arbeit von WENZEL [112] zeigt, dass eine Glättung der Kurven *nicht* sinnvoll ist. Aus diesem Grund werden die berechneten Spektren nicht durch Mittelungsverfahren geglättet. Diagramme, die zu den Ergebnissen in diesem Kapitel führen, aber hier nicht dargestellt werden, finden sich im Anhang B ab Seite 100.

Zuschnittsart

Obwohl in der DIN EN ISO 10534-2 keinerlei Angaben über Zuschnittsart und Genauigkeit des Prüflings gemacht werden und die Zuschnittsart demzufolge irrelevant sein müsste, werden deutliche Unterschiede im ermittelten Absorptionsgrad durch den Zuschnitt offenbar. Abbildung 18 zeigt die über alle Durchmesser hinweg gemittelten Absorptionsgrade für das 30 mm dicke Material. Gemittelt wurde auch über die Personen, die die Proben zugeschnitten haben, sowie die Montagerichtungen, die Messungs- und die Probennummern. Jede dieser Kurven wurde demnach aus 162 Messungen berechnet, die miteinander gemittelt wurden.

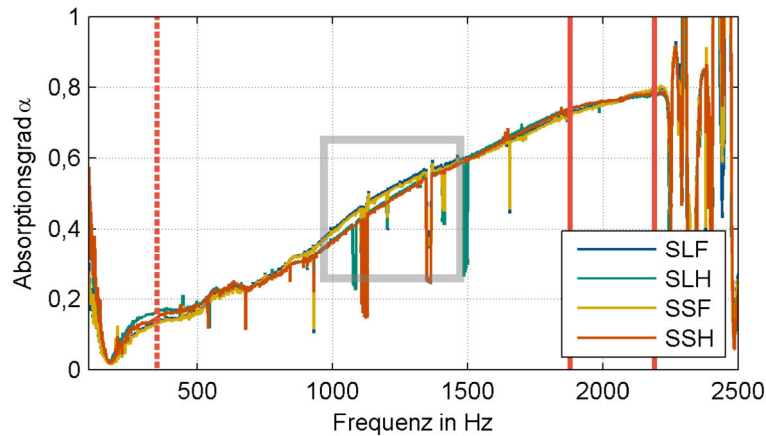


Abbildung 18: Auswirkung von verschiedenen Sägeverfahren auf den Absorptionsgrad, Probendicke 30 mm

Die dadurch sichtbaren Unterschiede zeigen folglich durchaus einen Einfluss auf die Messungen. In Abbildung 18 sind ausschließlich die Sägeverfahren dargestellt, da auch über den Durchmesser gemittelt wurde. Mit roten senkrechten Linien sind die Grenzfrequenzen im Diagramm markiert: die untere Grenze aus dem Abstand der Mikrofone (48 mm) bei 354 Hz; die oberen beiden Grenzen kennzeichnen die Grenzen nach Gleichung (2.31) und Gleichung (2.30).

Im mittleren Frequenzbereich (graue Box im Diagramm), zwischen 1000 Hz und 1500 Hz liegen die berechneten Absorptionsgrade aus den Messungen der mithilfe der Probenführung gefertigten Proben dicht beieinander; die von Hand gefertigten Messungen ebenso. Sie unterscheiden sich um etwa 4 %. Bei den 80 mm dicken Proben tritt dieser Effekt nicht mehr auf (siehe Abbildung B-12 auf Seite 105). In jedem gezeigten Spektrum sind deutliche Einbrüche zu erkennen. Ein systematischer Fehler in der Messkette, beispielsweise im Rauschgenerator, ist naheliegend, da die Einbrüche bei verschiedenen Messungen bei den gleichen Frequenzen oder in den gleichen Frequenzbereichen auftreten. Auf eine Interpolation der berechneten Absorptionsgradspektren zur Glättung der Kurven wurde aufgrund von WENZELS Untersuchungen [112, 113] verzichtet. WENZEL berechnet aus Absorptionsgradspektren Einzahlwerte mithilfe von linearer Regression und optimiert die Berechnung der für die lineare Regression genutzten Größen mithilfe Neuronaler Netze.

Wird der Durchmesser nicht mehr mit in die Mittelung einbezogen, die Grafiken zum Einfluss der Zuschnittsart auf den Absorptionsgrad also für jeden Durchmesser erstellt, offenbaren sich bei der dünnsten Materialstärke große Unterschiede im berechneten Absorptionsgrad. Abbildung B-13 auf Seite 106 zeigt alle Absorptionsgrade pro Durchmesser abhängig vom Fertigungsverfahren. Exemplarisch zeigt Abbildung 19 für den Durchmesser 90 mm alle möglichen Zuschnittsverfahren und deren Auswirkung auf den Absorptionsgrad. Eine große Streuung zwischen den Fertigungsverfahren ist offensichtlich.

Bei dem Durchmesser 89 mm (siehe Abbildung B-13 auf Seite 106) ist der Zuschnitt mit Hitzdraht im mittleren Frequenzbereich zwischen 1000 Hz und 1600 Hz unauffällig. Zwischen den berechneten

Absorptionsgraden aus dem Zuschnitt mit Wasserstrahl und dem Zuschnitt an der Bandsäge bei hoher Motordrehzahl und unter Verwendung der Führung liegen allerdings 10 % bei etwa 1200 Hz. Hochfrequent bleiben diese Differenzen bestehen, wenn auch zwischen dem Zuschnitt mit Hitzdraht und dem langsamen Zuschnitt an der Säge SLF.

Auch beim Zuschnitt der Proben mit 90 mm Durchmesser zeigen sich ähnlich große Abweichungen zwischen den Zuschnittsverfahren, wie Abbildung 19 zeigt. Zunächst sind wieder die vielen Einbrüche im berechneten Absorptionsgrad auffällig. Im Rahmen der Arbeit konnte die Ursache dafür nicht gefunden werden. Die Messkette wurde mehrmals täglich neu kalibriert. Dennoch lassen sich zwei Ursachen vermuten: entweder wurde vom Signalgenerator kein ideales weißes Rauschen als Signal produziert, oder es lag ein technischer Defekt beim Lautsprecher vor, sodass bestimmte Frequenzen nicht übertragen werden konnten.

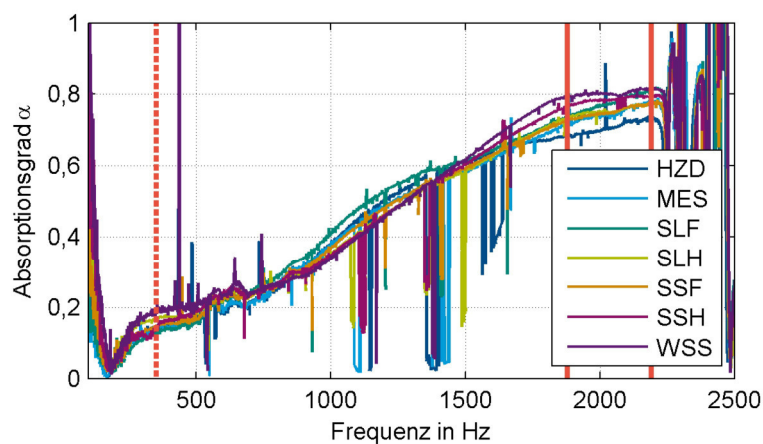


Abbildung 19: Auswirkung von verschiedenen Zuschnittsverfahren auf den berechneten Absorptionsgrad, Probendicke 30 mm, Durchmesser 90 mm

Die berechneten gemittelte Absorptionsgradspektren vom Zuschnitt mit dem rotierenden Messer, die nur für diesen Durchmesser betrachtet werden können, stimmen gut mit denen aus dem SSF-Verfahren überein. Bis 1600 Hz liegen auch die aus dem HZD-Zuschnitt gemittelten Kurven nahezu kongruent mit denen aus SSF- und MES-Zuschnitten. Kurz vor der Grenzfrequenz nach Gleichung (2.31) bei 1888 Hz teilen sich alle berechneten Kurven wieder auf und es bestehen Unterschiede im Absorptionsgrad von bis zu 11 % zwischen dem HZD- und dem WSS-Zuschnitt.

Das gleiche Bild ergibt sich auch für den Probenzuschnitt der Übermaßprobe mit einem Durchmesser von 91 mm bei einer Probendicke von 30 mm (siehe Abbildung B-13 auf Seite 106): Zwischen 800 Hz und 1400 Hz liegen die Absorptionsgrade der Sägezuschnittsverfahren beieinander, wobei es wieder zwischen dem Absorptionsgrad mit dem geringsten berechneten Absorptionsgrad (Zuschnitt mit SLH) und dem mit dem höchsten berechneten Absorptionsgrad (Zuschnitt mit HZD) eine Differenz von bis zu 10 % gibt (bei etwa 1750 Hz). Für die 30 mm dicken Proben ist es also nicht möglich eine klare Empfehlung zu geben, welches Fertigungsverfahren immer maximale Werte im

Absorptionsgradspektrum liefert. Die Kenntnis, mit welchem Fertigungsverfahren dies erreicht werden kann, ist aus wissenschaftlicher Sicht nicht relevant, kann aber für Hersteller interessant sein.

Die Auswertung der 40 mm dicken Proben zeigt ähnliche Resultate (siehe Abbildung B-14 auf Seite 107). Auffällig ist, dass der Zuschnitt mit Wasserstrahl sowohl bei der Untermaßprobe als auch bei der maßhaltigen Probe den höchsten berechneten Absorptionsgrad zeigt. Bei der Übermaßprobe liefert nur der Zuschnitt mit Hitzdraht einen höheren Absorptionsgrad. Allerdings ist gerade dieser Zuschnitt bei der Untermaßprobe der mit dem geringsten Absorptionsgrad. Im Bereich von 650 Hz bis 1300 Hz liegt der Absorptionsgrad aus dem HZD-Zuschnitt mindestens 5 % unter den Absorptionsgraden der anderen Zuschnitte. Die 90 mm-Probe zeigt die geringsten Abweichungen zwischen den Absorptionsgraden, wenngleich diese immer noch, besonders ab 1150 Hz, bis zu 10 % betragen. Unterhalb von 1150 Hz weisen die Kurven untereinander nur eine Abweichung von 3 – 6 % auf. Wieder liegen, unabhängig vom betrachteten Durchmesser der Probe, etwa 10 % zwischen dem Absorptionsgrad mit den höchsten Werten und dem Absorptionsgrad mit den kleinsten Werten zwischen 1250 Hz und 1400 Hz. Bei der Übermaßprobe sind es sogar 13 % bei 1350 Hz und bei der Untermaßprobe besteht sogar ein Unterschied von 16 % bei 2150 Hz, kurz vor der Grenzfrequenz des Rohres bei 2191 Hz nach Gleichung (2.30). Diese Abweichungen der Kurven voneinander im hochfrequenten Bereich werden deutlich kleiner, wenn die Probendicke zunimmt. Insgesamt sind die Verläufe der Kurven deutlich glatter und von weniger Ausreißern betroffen. Vermutlich liegt das an der gestiegenen Probendicke, denn auch die Auswertungen des 50 mm und des 80 mm dicken Materials zeigen deutlich weniger Rauschen in den Messkurven. Die großen Einbrüche im Absorptionsgrad erfolgen immer bei den gleichen Frequenzen: 1080 Hz, 1170 Hz und 1385 Hz.

Die berechneten Absorptionsgrade der 50 mm dicken Materialprobe (siehe Abbildung B-15 auf Seite 108) zeigen keine besonderen Auffälligkeiten. Einzig der Absorptionsgrad, berechnet aus Messungen von Proben mit einem WSS-Zuschnitt, sticht bei der Auswertung der Daten der Übermaßproben deutlich heraus. Der Verlauf des Absorptionsgrades liegt bis 1400 Hz bis zu 8 % über dem tiefsten Absorptionsgrad. Ab 1400 Hz ist der berechnete Absorptionsgrad aber deutlich geringer als jener der anderen Fertigungsverfahren. Auch im unteren Frequenzbereich, nahe der Grenzfrequenz von 354 Hz, besteht eine Abweichung von etwa 8 % zwischen den Fertigungsverfahren.

Beim 80 mm dicken Material (siehe Abbildung B-16 auf Seite 109) ist es ebenfalls der Wasserstrahlzuschnitt, der eindeutig andere Ergebnisse beim berechneten Absorptionsgrad liefert als die anderen Fertigungsverfahren. Sowohl bei der Probe mit leichtem Untermaß als auch bei der Probe mit 90 mm Durchmesser wird das Maximum der Schallabsorption um etwa 350 Hz in den höherfrequenten Bereich verschoben. Die Absorptionsgrade der Sägezuschnittsverfahren SSH, SLH, SSF und SLF zeigen alle sehr gut miteinander übereinstimmende Kurven mit nur kleinen Abweichungen untereinander von maximal 2 % bei 2100 Hz. Das Maximum der Schallabsorption hat der 80 mm dicke Schaum

bei 750 Hz beim Zuschnitt nach einem Sägeverfahren. Das Maximum der anhand der Proben mit WSS-Zuschnitt ermittelten Absorptionsgrade liegt deutlich verschoben bei 1050 Hz – sowohl bei der Probe mit einem Durchmesser von 89 mm als auch bei der Probe mit 90 mm Durchmesser. Die Durchmesser der Proben, die Rundheit und die Zylinderform entsprechen den Anforderungen. Deshalb muss bei diesem Ergebnis zwingend von Materialinhomogenitäten ausgegangen werden. Die Übermaßprobe mit einem Durchmesser von 91 mm zeigt nämlich in dieser Auswertung, dass die Abweichungen zwischen den einzelnen Zuschnittsverfahren über einen großen Frequenzbereich von 500 Hz bis zu den Grenzfrequenzen maximal 4 % beim Absorptionsgrad betragen. Lediglich zwischen 354 Hz und 500 Hz gibt es Abweichungen von maximal 8 % zwischen dem Absorptionsgrad aus den SLF- und den übrigen Proben. Die Übereinstimmung zwischen den Zuschnittsverfahren ist damit gegeben.

Einfluss des Faktors Person auf den Absorptionsgrad

Die Zuschnitte MES, WSS und HZD werden unter „Extern“ zusammengefasst, auch wenn der MES-Zuschnitt von Person A angefertigt wurde. Die Wahrung des Probendurchmessers ist durch den festgelegten Durchmesser des rotierenden Messers gegeben. Wird nur über den Zuschnitt gemittelt und werden andere Faktoren wie der Probendurchmesser, die Montagerichtung, die Probennummer und die Messung nicht beachtet, zeigt sich, dass die Abweichung zwischen den gemessenen Absorptionsgraden bei den 30 mm dicken Materialproben deutlich geringer ist als bei den 80 mm dicken Prüflingen. Im Anhang B wird dies in Abbildung B-17 auf Seite 110 deutlich. Zudem wird erkennbar, wie groß der Einfluss des Faktors Mensch ausfällt: Der Verlauf des Absorptionsgrades ändert sich allein bedingt durch die Erfahrung beim Zuschnitt der Probe. Den Kurven zur Abhängigkeit von einer Person liegen 216 Mittelungen zugrunde (drei Durchmesser, vier Zuschnittsarten, zwei Montagerichtungen, drei Prüflinge, drei Messungen); der gemittelte Absorptionsgrad „Extern“ wurde aus 126 Einzelabsorptionsgradkurven berechnet (drei Durchmesser, zwei Zuschnittsarten HZD WSS, zwei Montagerichtungen, drei Prüflinge, drei Messungen + ein Durchmesser, eine Zuschnittsart MES, zwei Montagerichtungen, drei Prüflinge, drei Messungen). Person B verfügt im Gegensatz zu Person A und C nicht über eine abgeschlossene Ausbildung zum Industriemechaniker. Das bedeutet, dass allein der Faktor Mensch mit seiner Erfahrung einen Unterschied von 11 % im Absorptionsgrad (700 Hz) ausmachen kann (siehe Abbildung 20). Auffällig ist auch, dass das Maximum der Schallabsorption etwa um 100 Hz in den tieferen Frequenzbereich verschoben ist, verglichen mit dem Zuschnitt durch die beiden anderen Personen oder dem externen Zuschnitt. Das gemittelte Absorptionsgradspektrum der Zuschnitte, welche unter „Extern“ zusammengefasst werden, ist deutlich von dem bereits besprochenen WSS -Zuschnitt beeinflusst, bei dem eine Materialinhomogenität vermutet wird.

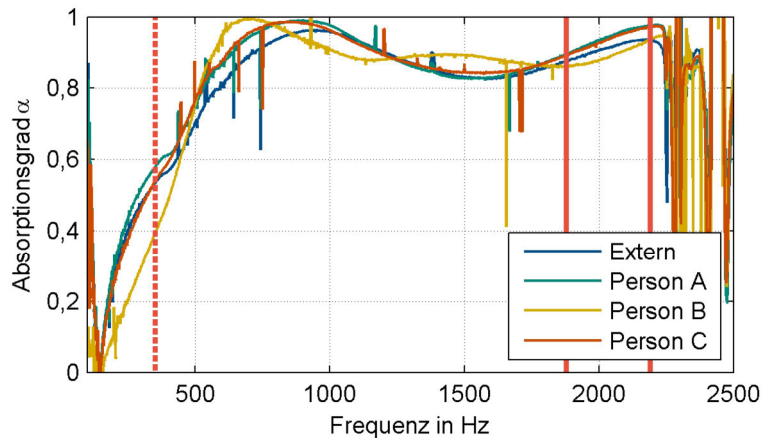


Abbildung 20: Absorptionsgrad über Frequenz in Abhängigkeit von der fertigenden Person, Probendicke 80 mm

Im Anhang befinden sich auch die Grafiken zu den anderen Probendicken. Die von den 30 mm dicken Proben berechneten Absorptionsgrade zeigen eine deutliche Streuung zwischen den fertigenden Personen bei den Übermaß- und den Untermaßproben (siehe Abbildung B-18 auf Seite 111). Die Streuung bei der Probe mit einem Durchmesser von 90 mm ist hingegen sehr klein. Auch hier zeigen sich wieder deutliche Ausreißer im berechneten Absorptionsgrad im Bereich 1100 Hz bis 1200 Hz und 1300 bis 1400 Hz sowie 1500 Hz und 1600 Hz bis 1750 Hz. Es kann nicht festgestellt werden, ob es am Material liegt oder ob, wie bereits beschrieben, ein technischer Defekt am Lautsprecher diese starken Ausreißer über weite Frequenzbereiche hinweg auslöst. Wie auch bei der vorherigen Auswertung sind diese bei dem 40 mm dicken Material weitaus weniger stark ausgeprägt (siehe Abbildung B-19 auf Seite 112). Allerdings werden die Abweichungen zwischen den gemittelten Absorptionsgraden hinsichtlich des Faktors „fertigende Person“ immer größer. Bei der Probe mit einem Durchmesser von 90 mm besteht schon bei 400 Hz eine Differenz von 10 % zwischen dem Absorptionsgrad aus Proben von Person B und den anderen gemittelten Absorptionsgraden. Bei 1530 Hz sind es bereits 12 %. Bei der Probe mit einem Durchmesser von 89 mm zeigt sich das gleiche Muster. Die berechneten Absorptionsgrade aus den Zuschnitten von Person A und C sind bei dieser Materialstärke nicht in gleichem Maße übereinstimmend wie bei den Mittelungen der 30 mm dicken Proben.

Bei den 50 mm dicken Proben stimmen die gemittelten Absorptionsgrade der Zuschnitte der beiden Personen A und C wieder gut miteinander überein (siehe Abbildung B-20 auf Seite 113). Immer wieder weichen die gemittelten Absorptionsgradkurven von Person B von denen der anderen beiden Personen ab. Selbst die unter „Extern“ gemittelten Absorptionsgrade stimmen gut mit denen der Person A und C bei den Auswertungen der 89 mm- und der 90 mm-Probe überein. Die Auswertung der 91 mm-Probe hingegen zeigt zwischen 600 Hz und 1100 Hz einen um etwa 4 – 7 % höheren Absorptionsgrad bei der externen Fertigung als der von Person A und C.

Am größten ist allerdings die Abweichung zwischen den gemittelten Absorptionsgradkurven aus den 80 mm dicken Proben (siehe Abbildung B-21 auf Seite 114). Wieder stimmen die Ergebnisse der berechneten Absorptionsgrade der Proben von Person A und C sehr gut miteinander überein. Damit besteht ein deutlicher Hinweis darauf, dass die Erfahrung beim Probenzuschnitt durchaus einen Einfluss auf den bestimmten Absorptionsgrad hat. Der maximale Absorptionsgrad wird durch Zuschnitte von Person B erreicht – unabhängig vom gefertigten Probendurchmesser. Das Maximum im Absorptionsgrad liegt etwa 100 Hz zu tieferen Frequenzen verschoben als durch den Zuschnitt der Personen A und C oder durch den externen Probenzuschnitt. Der berechnete Absorptionsgrad aus den extern gefertigten Proben stimmt von 1000 Hz bis 1700 Hz mit dem von Person A und C überein. Außerhalb dieser Grenzen betragen die Abweichungen dazu nur maximal 4 % bei 410 Hz.

Auf Basis der bisherigen Untersuchungen stellt sich daher die Frage, ob die Abweichungen im Absorptionsgrad bedingt durch das Zuschnittsverfahren mithilfe der Bandsäge (SSH, SLH, SSF, SLF) bei einer Person besonders stark sind oder ob sich die Absorptionsgrade von Proben eines Zuschnittsverfahrens – unabhängig von der Person des Zuschnitts – deutlich von den anderen unterscheiden. Dazu werden wieder Mittelungen gebildet, die es ermöglichen, Absorptionsgradspektren visuell miteinander zu vergleichen. Die Auswertung (siehe Abbildung B-22 auf Seite 116) zeigt, dass die berechneten Absorptionsgradspektren der Proben von Person 1 jeweils beim 30 mm dünnen Material und beim 80 mm dicken Material unabhängig vom Sägeverfahren nahezu identisch sind. Große Abweichungen sind beim 50 mm dicken Material dort erkennbar, wo der Zuschnitt SSF zwischen 800 Hz und 1050 Hz einen bis zu 10 % höheren Absorptionsgrad zeigt als die ohne Führung zugeschnittenen Proben. Dieser Effekt zeigt sich allerdings nicht beim 40 mm dicken Material; hier ist es der SSH-Zuschnitt, der deutlich bis zu 5 % höhere Absorption zeigt als andere Zuschnittsarten an der Säge. Die Zuschnitte von Person C liefern – unabhängig vom Zuschnittsverfahren – bei den 40 mm, 50 mm und 80 mm dicken Proben nahezu identisch aussehende Absorptionsgradverläufe (siehe Abbildung B-24 auf Seite 120). Allerdings gibt es im Bereich 800 Hz bis 1400 Hz große Abweichungen zwischen den handgeführten Proben und den Proben, die mithilfe der Führung gefertigt wurden. Bei Person B werden aufgrund der bisherigen Auswertung die größten Abweichungen zwischen den Zuschnittsverfahren erwartet. Diese Annahme wird bestätigt, denn außer bei den 80 mm dicken Proben gibt es bei jeder Probendicke bis zu 8 % Abweichungen zwischen den Absorptionsgradverläufen (siehe Abbildung B-23 auf Seite 118). Abbildung 21 zeigt alle gemittelten Sägezuschnittsverfahren (SSH, SLH, SSF, SLF) von Person B für das 30 mm dicke Material. Hier liegt die 8 % Abweichung zwischen dem langsamen Zuschnitt per Hand und dem Zuschnitt mithilfe der Führung.

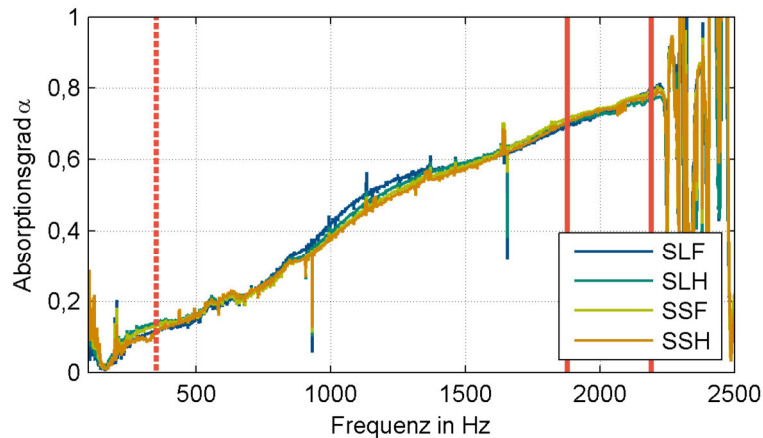


Abbildung 21: Abhängigkeit des Absorptionsgrades von der Person des Zuschnitts und vom Fertigungsverfahren; hier Person B; Probendicke 30 mm

Einfluss des Faktors Materialdicke

Obwohl rein physikalisch evident ist, dass die Materialdicke – und damit die Probendicke – einen Einfluss auf den berechneten Absorptionsgrad hat, sei dieser Faktor hier noch einmal dargestellt. Abbildung 22 zeigt deutlich für den Probendurchmesser 90 mm, dass der Absorptionsgrad materialdickenabhängig ist. Dies trifft für die anderen Probendurchmesser von 89 mm und 91 mm ebenfalls zu (siehe Abbildung B-25 auf Seite 121).

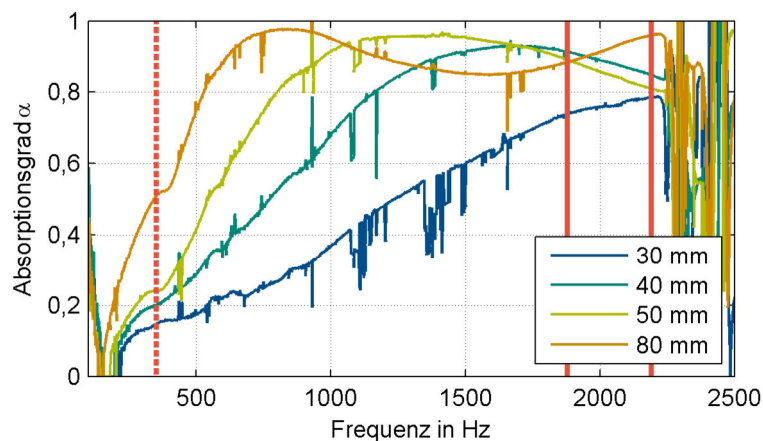


Abbildung 22: Zunahme des Absorptionsgrades bei zunehmender Probendicke über der Frequenz

Jedem dieser Absorptionsgrade liegen zahlreiche Messungen zugrunde, um den gemittelten Absorptionsgrad in Abhängigkeit von der Probendicke darzustellen. Auch wenn bei einzelnen Messungen technische Probleme am Signalgenerator oder Lautsprecher auftreten und dadurch einzelne Absorptionsgradspektren nicht im kompletten Spektrum korrekt berechnet werden konnten, sind diese fehlerhaft berechneten Spektren durch die Mittelungen weiterhin enthalten. So sind die bei einzelnen Frequenzen stark abfallenden oder ansteigenden Absorptionsgrade zu erklären (siehe Abbildung 22).

Einfluss des Faktors Einbaumöglichkeit

Bereits in den Voruntersuchungen wurde ein möglicher Einfluss der Einbaumöglichkeiten auf den Absorptionsgrad festgestellt. Beim Einbau des Prüflings befindet sich der bewegliche Stempel im Probenhalter entweder bereits an der anhand der Probendicke eingestellten Position oder der Stempel wird mitsamt dem Prüfling entsprechend der Probendicke positioniert. Beide Möglichkeiten führen zum gleichen Ergebnis beim Probeneinbau: Die Probe schließt bündig mit dem Probenhalter ab. Beide Möglichkeiten zum Einbau wurden 5.4 vorgestellt. Auch für die Auswertung hinsichtlich des Faktors „Einbaurichtung“ wird die Betrachtung abhängig von der Probendicke gewählt: Bei der 30 mm dicken Probe zeigen sich Unterschiede bis zu 4 % über das gesamte Spektrum (Abbildung 23), wobei nicht immer dieselbe Montageart den höheren Absorptionsgrad liefert. Im mittleren Frequenzbereich um 1000 Hz zeigt der Einbau von oben, also bei vorherigem Einstellen der Probendicke am Stempel, den höheren Absorptionsgrad, ab 1400 Hz ist der Absorptionsgrad der von unten eingebauten Proben höher.

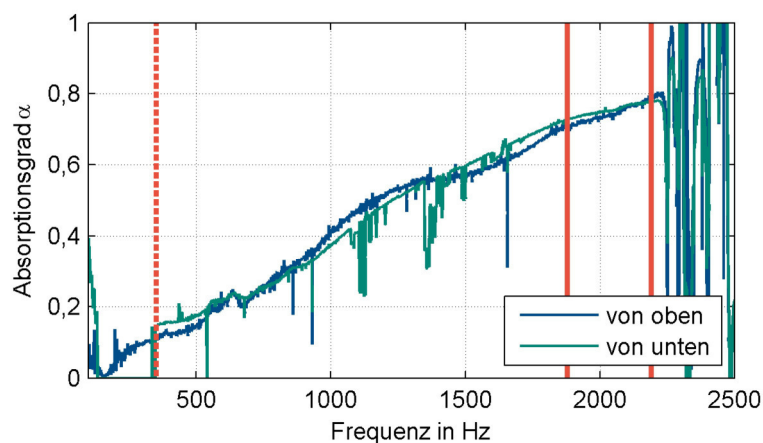


Abbildung 23: Einfluss des Probeneinbaus auf den Absorptionsgrad, Probendicke 30 mm

Abbildung 23 sowie den in Abbildung B-1 auf Seite 100 dargestellten Absorptionsgraden in Abhängigkeit von der Einbaurichtung, aufgeschlüsselt nach der Probendicke, liegen jeweils 387 Mittelungen pro berechnetem gemittelten Absorptionsgrad zugrunde [(eine Probendicke, drei Durchmesser, vier Sägeverfahren, drei Personen, drei Zuschnitte, drei Messungen) + (eine Probendicke, drei Durchmesser, zwei CNC-Verfahren, eine Person, drei Zuschnitte, drei Messungen) + (eine Probendicke, ein Durchmesser, ein Zuschnittsverfahren MES, eine Person, drei Zuschnitte, drei Messungen)]. Bei dem 40 mm dicken Material besteht kein Unterschied zwischen den beiden Einbaurichtungen. Die berechneten gemittelten Absorptionsgrade sind identisch; ebenso verhält es sich bei den 50 mm und den 80 mm dicken Proben (vergleiche hierzu Abbildung B-26 auf Seite 123).

Für die 30 mm dicken Proben lohnt sich ein detaillierterer Blick in die Mittelungen, da es offensichtlich Abweichungen zwischen beiden Einbausituationen gibt. Um die Ursache für diese Abweichungen zu finden, wird der Faktor Durchmesser aus der Mittelung entfernt und die Auswertung für jeden

Durchmesser gesondert erstellt. Es zeigt sich, dass sich der Absorptionsgrad nur bei Übermaßproben mit einem Durchmesser von 91 mm abhängig von der Montagerichtung ändert. Bei Untermaßproben mit einem Durchmesser von 89 mm besteht keine Abhängigkeit des Absorptionsgrades von der Montagerichtung (Abbildung B-1 auf Seite 100). Abbildung 24 zeigt deutlich den Unterschied von 5 % bei 1600 Hz zwischen den berechneten Absorptionsgraden beider Einbaumöglichkeiten bei einer Übermaßprobe (Durchmesser 91 mm).

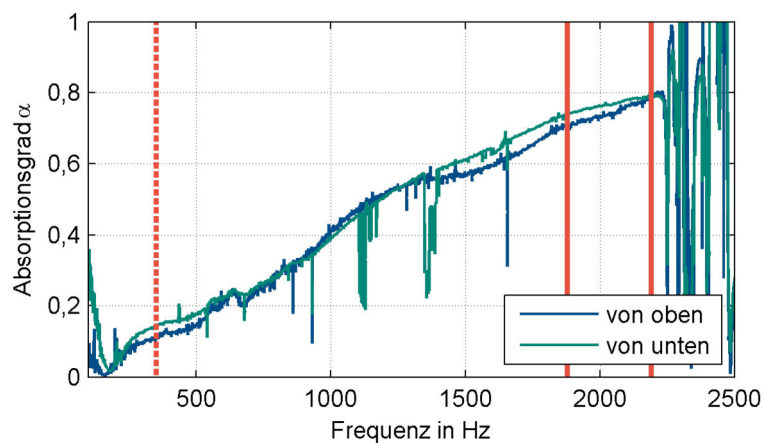


Abbildung 24: Abhängigkeit des Absorptionsgrades von der Einbauvariante der Probe; Probendicke 30 mm, Durchmesser 91 mm

Die anderen Probendicken zeigen, wie nach der ersten Auswertung erwartet, keinen Einfluss der Montagerichtung auf den Absorptionsgrad (Abbildung B-28–Abbildung B-30 auf Seite 125–127). Die Ursache der verschiedenen Absorptionsgradkurven durch die Einbaurichtung bei der 30 mm dicken Probe wird in der Schnittkantenbeschaffenheit durch die verschiedenen Zuschnittsverfahren vermutet. Beim WSS und HZD zeigen sich nur minimale Unterschiede, die berechneten Absorptionsgradkurven, berechnet aus Messungen von Proben mit den Zuschnitten SLF, SLH und SSH, liegen sogar nahezu deckungsgleich aufeinander. Einzig das SSF-Verfahren liefert bei der Probendicke von 30 mm, wo auch die Unterschiede zwischen den Montagerichtungen auftreten, Unterschiede im Absorptionsgrad von bis zu 5 % zwischen 1500 Hz und 1750 Hz verglichen mit anderen Zuschnittsverfahren. Die These, dass die Beschaffenheit der Schnittkante die Ursache für die verschiedenen Absorptionsgrade durch die verschiedenen Einbaurichtungen ist, kann damit nicht bestätigt werden: Die glatten Schnittkanten durch den HDZ und WSS Zuschnitt beeinflussen den berechneten Absorptionsgrad abhängig von der Montagerichtung ebenso wenig, wie die rauen Schnittkanten durch den Sägezuschnitt mit geringer Antriebsleistung des Motors an der Bandsäge. Der Unterschied der Absorptionsgrade durch die Montagerichtung muss daher eine andere Ursache haben. Es ist technisch möglich, dass sich Schaumstoffmaterial im Spalt zwischen Rohrwandung und beweglichem Stempel einklemmt und dass dadurch das Material zusätzlichen Spannungen ausgesetzt wird. Bei der 30 mm

dicken Probe ist dieser Effekt aufgrund der geringen Probendicke, verglichen mit einer 80 mm dicken Probe, wahrscheinlich größer.

Änderungen des Absorptionsgrades durch einen vermuteten „Lerneffekt“

Der letzte zu untersuchende Effekt ist der vermutete „Lerneffekt“. Hierbei soll geprüft werden, ob sich die Absorptionsgrade der gefertigten Proben – von Probe 1 bis 3 – voneinander unterscheiden. Da CNC-gesteuerte Verfahren wie der HZD- und der WSS-Zuschnitt keinen „Lerneffekt“ zeigen können, werden für die Auswertung des Faktors „Lerneffekt“ abermals lediglich die Sägeverfahren betrachtet. Für jede Person wird gesondert ausgewertet, ob es unabhängig vom Zuschnittsverfahren Unterschiede in den berechneten Absorptionsgraden gibt, die sich auf einen Lerneffekt beim Zuschnitt zurückführen lassen können. Um den Effekt sicher detektieren zu können, wird das Spektrum des Absorptionsgrades pro Probendicke berechnet. Abbildung B-32 bis Abbildung B-43 auf den Seiten 130 bis 141. zeigen die berechneten Absorptionsgradverläufe aufgeschlüsselt nach Person, Durchmesser und Probendicke. Jeder berechnete Absorptionsgrad wurde aus 24 Messungen gemittelt (ein Durchmesser, eine Probendicke, vier Zuschnittsarten, eine Person, zwei Einbaurichtungen, drei Messungen). Bei Person A und C unterscheiden sich die berechneten Absorptionsgrade der zugeschnittenen Proben kaum voneinander. Besonders bei dem 30 mm starken Material und dem 80 mm starken Material sind kaum Unterschiede im berechneten Absorptionsgrad zwischen Zuschnitt 1 bis Zuschnitt 3 festzustellen. Die Absorptionsgrade von den Proben von Person B hingegen unterscheiden sich deutlich in Abhängigkeit von der Probennummer, besonders bei den berechneten Absorptionsgraden bei dem 30 mm und dem 40 mm dicken Material. Ein Lerneffekt kann damit nicht experimentell bestätigt werden, weil dieser unabhängig von der Probendicke auftreten müsste.

6.2 Einfluss der Faktoren auf Einzahlwerte des Absorptionsgrades

Ähnliche Untersuchungen, wie die eben gezeigten Änderungen des Schmalbandspektrums durch die Faktoren, werden im Folgenden an Einzahlwerten dargestellt. Hier werden folgende Methoden angewandt: Varianzanalyse, Effektberechnung und Berechnung der Wechselwirkungen. In diesem Kapitel nicht dargestellte Diagramme und Tabellen, die dem Erkenntnisgewinn dienen, finden sich in Anhang C ab Seite 143.

Die bisher erhobenen Daten mit den Faktoren und Faktorstufen erlauben mehrere Versuchspläne, um alle messtechnisch untersuchten Faktoren abzudecken:

- Versuchsplan 1: alle Sägezuschnitte
- Versuchsplan 2: externer Zuschnitt
- Versuchsplan 3: Probenzuschnitte mit Probendurchmesser 90 mm, Zuschnitt von Person A
- Versuchsplan 4: Probendicke 30 mm, Sägezuschnitte

-
- Versuchsplan 5: Probendicke 40 mm, Sägezuschnitte
 - Versuchsplan 6: Probendicke 50 mm, Sägezuschnitte
 - Versuchsplan 7: Probendicke 80 mm, Sägezuschnitte

Zunächst werden Varianzanalysen für die bereits vorgestellten Zielgrößen α_w , Mittelwert, mittlere quadratische Abweichung, Varianz, Schiefe und Wölbung berechnet, um die einzelnen Faktoren auf Signifikanz zu testen.

6.2.1 Statistische Versuchsauswertung mithilfe der Varianzanalyse

Mithilfe der Varianzanalyse wird berechnet, wie sich Änderungen eines Faktors auf eine Zielgröße auswirken. Sie wird speziell bei komplexen Systemen eingesetzt, bei denen die Änderungen gegenseitige Wechselwirkungen hervorrufen. Teil der Analyse ist es, den Einfluss einzelner Faktoren auf eine Zielgröße zu berechnen und ein Ranking der bedeutendsten Einflussfaktoren zu erstellen. Auch wenn die Varianzanalyse ein sehr robustes Verfahren ist, werden die Grundvoraussetzungen – der Nachweis der Normalverteilung und der Gleichverteilung der Residuen – erbracht und überprüft. Die Varianzen der Residuen müssen gleich sein, was durch einen F-Test berechnet oder in einem Punktediagramm dargestellt werden kann. Anschließend kann die in MATLAB implementierte Funktion für die Varianzanalyse genutzt werden. Das Systemverhalten wird mit einem in MATLAB implementierten fixed effects model mit Wechselwirkungen beschrieben. Dieses Modell kann gewählt werden, weil die Faktorstufen bekannt und gezielt ausgewählt worden sind [27]. Die Daten der Varianzanalyse liefern erste Hinweise darauf, welche Faktoren tatsächlich einen signifikanten Einfluss auf den berechneten Absorptionsgrad haben. Die Höhe des Einflusses wird durch anschließende Effektberechnungen geklärt. Für jeden oben genannten Versuchsplan werden alle Zielgrößen berechnet.

Nachweis der Normalverteilung und der Gleichheit der Residuen

Mithilfe der MATLAB-Funktion `normplot` werden die Daten auf ihre Normalverteilung geprüft. Dabei werden die Daten so angeordnet, dass sie im besten Fall auf einer Geraden liegen, wenn eine Normalverteilung gegeben ist. Diese Voraussetzung muss für die Berechnung einer Varianzanalyse erfüllt sein. Der Berechnung liegt ein Hypothesentest zugrunde. Dabei ist die Nullhypothese H_0 die Annahme, dass die Stichproben normalverteilt sind. Die Alternativhypothese H_1 besagt, dass sie von der Normalverteilung abweichen. Die Normalverteilung wird für jede Zielgröße berechnet. Beispielfhaft ist in Abbildung 25 die Normalverteilung der Zielgröße Mittelwert bei der Probendicke 80 mm gezeigt.

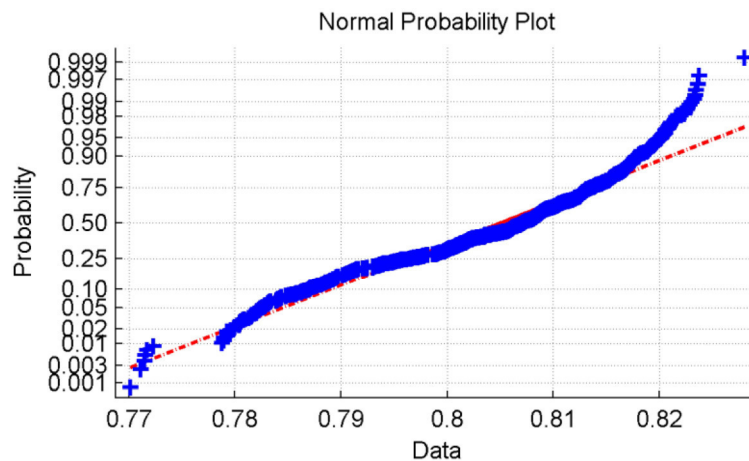


Abbildung 25: Nachweis der Normalverteilung, Probendicke 80 mm, Zielgröße Mittelwert

Der Residuenplot in Abbildung 26 zeigt die um den Mittelwert bereinigten Daten $y - \bar{y}$. Die Varianzen sollten in der gleichen Größenordnung liegen.

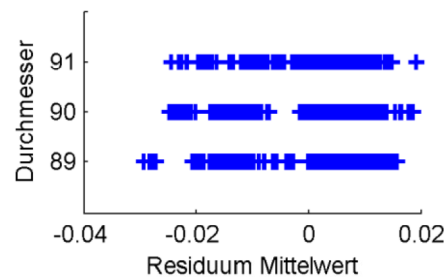


Abbildung 26: Nachweis: Gleichheit der Residuen, Probendicke 80 mm, Zielgröße Mittelwert

Die Varianzen der verschiedenen Durchmessergruppen sind nahezu identisch. Andere Varianzen, zum Beispiel innerhalb der verschiedenen Zuschnittsarten, wurden ebenfalls überprüft. Diese sowie die Residuen, berechnet aus anderen Versuchsplänen und für andere Zielgrößen, zeigen die Gleichheit der Varianzen, womit die Voraussetzungen für die Varianzanalyse erfüllt sind. Eine Ausnahme stellt die Zielgröße α_w dar (siehe Abbildung C-3 auf 144). Für diese Zielgröße konnten die Normalverteilung und auch die Gleichheit der Residuen nicht nachgewiesen werden. Die Zielgröße α_w wird an der verschobenen Referenzkurve aus [111] abgelesen. Auf die zusätzliche Kennzeichnung, wie in Abschnitt 5.7 beschrieben, wird zugunsten eines Einzahlwertes verzichtet. Nach [111] ist die Referenzkurve von 250 Hz bis 4000 Hz definiert – ein Frequenzbereich, der durch die Messungen im verwendeten Kundt'schen Rohr nicht komplett abgedeckt werden kann. Für die Berechnung der in dieser Arbeit verwendeten Zielgröße α_w sind also nur drei von sechs erforderlichen Werten des Absorptionsgrades im Oktavspektrum eingesetzt worden. Trotzdem können die in der Arbeit verwendeten Methoden genutzt werden. Die Berechnungen der Zielgröße Mittelwert zeigen ähnliche Ergebnisse bei der Varianzanalyse und der Effektberechnung.

Klassischerweise ist das Ergebnis der Varianzanalyse eine Tabelle, in der folgende Größen aufgeführt sind: *sum of squares* (TSS; siehe (2.33)), Freiheitsgrade des Faktors d.f., *mean squares* (SSB, (2.36)),

F-Wert ((2.38)) und der p-Wert. Der p-Wert ist die Wahrscheinlichkeit für den Fehlertyp I. Abhängig von der Höhe des Signifikanzniveaus wird die Nullhypothese nicht verworfen oder die Alternativhypothese angenommen. Er gibt damit einen Hinweis darauf, ob ein Ergebnis unter Berücksichtigung eines Restrisikos zufällig entstehen kann. Je höher der p-Wert, desto wahrscheinlicher ist es, dass das Ergebnis zufällig entstanden ist. Unabdingbar ist es dabei, ein Signifikanzniveau α festzulegen. Ist $p < \alpha_{stat.}$, kann das Testergebnis als statistisch signifikant betrachtet werden. Normalerweise wird ein Signifikanzniveau von $\alpha_{stat.} = 0,05$ angenommen [25], wodurch die Nullhypothese mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % nicht verworfen werden kann.

Tabelle 6 zeigt die Berechnungsergebnisse einer Varianzanalyse für die Zielgröße α_w anhand der Messdaten von den Proben mit Sägezuschnitt nach Versuchsplan 1. Anhand des TSS- Werts kann der Faktor Probendicke als dominanter Faktor identifiziert werden. In diesem Versuchsplan wurden vier Probendicken betrachtet, demzufolge hat dieser Faktor drei Freiheitsgrade (d.f. in Tabelle 6). Insgesamt hat das Modell 2591 Freiheitsgrade. Diese addieren sich aus zusätzlich zwei Freiheitsgraden von den drei Personen für den Zuschnitt, zwei Freiheitsgraden von drei Durchmessern und so weiter sowie aus den Freiheitsgraden der betrachteten und der theoretisch möglichen Wechselwirkungen. In der Varianzanalyse wurden bis zu drei Wechselwirkungen (mit den entsprechenden Freiheitsgraden) berechnet. Würden alle theoretisch möglichen Wechselwirkungen betrachtet werden, kämen 2318 Freiheitsgrade dazu, wodurch sich insgesamt 2591 Freiheitsgrade ergeben.

Die in Tabelle 6 gezeigten Haupteinflussfaktoren Probendicke, Durchmesser, Zuschnittsart, Einbau- richtung, Person und Probennummer werden aufgrund der großen Datenbasis von 3096 Messungen als signifikant eingestuft, weil der berechnete p-Wert $< \alpha_{stat.}$ ist. Einzelne Wechselwirkungen, beispielsweise die Wechselwirkung zwischen Probendicke und Einbau- richtung, werden nicht mehr als statistisch signifikant berechnet. Gut erkennbar am (kleinen) F-Wert ist, dass die Probennummer (also die Wiederholbarkeit einer Kombination) wenig Einfluss hat und somit auch nicht viel Streuung in den Messdaten erzeugt. Gleiches gilt auch für die Einbau- richtung. Die Restvarianz, ausgedrückt durch den berechneten Fehler (TSS *error*), ist klein.

Die Bedingungen – Normalverteilung der Zielgröße und Gleichheit der Residuen – müssen nicht zwingend erfüllt sein, weil es sich bei der Varianzanalyse um ein sehr robustes Verfahren handelt [25]. Dem Ergebnis der Varianzanalyse kann dennoch vertraut werden.

Tabelle 6: Ergebnis der Varianzanalyse für die Zielgröße α_W nach Versuchsplan 1

Source	TSS	d.f.	mean square	F	p-Wert
Probendicke	45,4	3	15,148	42202,772	0
Durchmesser	0,2	2	0,077	214,226	0
Zuschnittsart	0,1	3	0,019	53,191	0
Einbaurichtung	0,0	1	0,004	10,329	0,0013
Person	4,7	2	2,327	6482,427	0
ProbenNr	0,0	2	0,002	5,404	0,0046
Probendicke*Durchmesser	0,1	6	0,023	63,381	0
Probendicke*Zuschnittsart	0,0	9	0,005	13,056	0
Probendicke*Einbaurichtung	0,0	3	0,000	0,620	0,6021
Probendicke*Person	2,8	6	0,474	1319,287	0
Probendicke*ProbenNr	0,0	6	0,004	11,573	0
Durchmesser*Zuschnittsart	0,0	6	0,007	20,179	0
Durchmesser*Einbaurichtung	0,0	2	0,000	0,374	0,6884
Durchmesser*Person	0,0	4	0,006	17,310	0
Durchmesser*ProbenNr	0,0	4	0,001	3,654	0,0057
Zuschnittsart*Einbaurichtung	0,0	3	0,000	0,075	0,9733
Zuschnittsart*Person	0,0	6	0,005	13,822	0
Zuschnittsart*ProbenNr	0,0	6	0,004	10,087	0
Einbaurichtung*Person	0,0	2	0,000	1,002	0,3672
Einbaurichtung*ProbenNr	0,0	2	0,000	0,357	0,6995
Person*ProbenNr	0,0	4	0,002	4,888	0,0006
Probendicke*Durchmesser*Zuschnittsart	0,1	18	0,004	11,244	0
Probendicke*Durchmesser*Einbaurichtung	0,0	6	0,000	0,123	0,9937
Probendicke*Durchmesser*Person	0,1	12	0,005	13,774	0
Probendicke*Durchmesser*ProbenNr	0,0	12	0,002	6,831	0
Probendicke*Zuschnittsart*Einbaurichtung	0,0	9	0,000	0,398	0,9367
Probendicke*Zuschnittsart*Person	0,1	18	0,006	16,179	0
Probendicke*Zuschnittsart*ProbenNr	0,0	18	0,001	3,745	0
Probendicke*Einbaurichtung*Person	0,0	6	0,000	0,773	0,5911
Probendicke*Einbaurichtung*ProbenNr	0,0	6	0,000	0,386	0,8883
Probendicke*Person*ProbenNr	0,0	12	0,001	3,281	0,0001
Durchmesser*Zuschnittsart*Einbaurichtung	0,0	6	0,000	0,309	0,9325
Durchmesser*Zuschnittsart*Person	0,0	12	0,004	10,557	0
Durchmesser*Zuschnittsart*ProbenNr	0,0	12	0,002	6,241	0
Durchmesser*Einbaurichtung*Person	0,0	4	0,000	0,188	0,9447
Durchmesser*Einbaurichtung*ProbenNr	0,0	4	0,000	0,172	0,9528
Durchmesser*Person*ProbenNr	0,0	8	0,001	3,247	0,0011
Zuschnittsart*Einbaurichtung*Person	0,0	6	0,000	0,615	0,7182
Zuschnittsart*Einbaurichtung*ProbenNr	0,0	6	0,000	0,368	0,8994
Zuschnittsart*Person*ProbenNr	0,0	12	0,002	5,180	0
Einbaurichtung*Person*ProbenNr	0,0	4	0,000	0,535	0,7102
Error	0,8	2318	0,000		0
Total	54,7	2591	15,148	42202,772	0

Ein gern genutztes Mittel bei Versuchsplänen mit vielen Faktoren ist die Darstellung des TSS-Wertes als Balkendiagramm, um die größten Einflussfaktoren und die stärksten Wechselwirkungen auf einen Blick zu identifizieren (Abbildung 27).

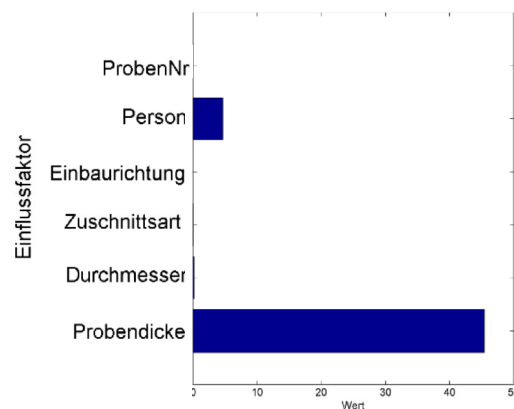


Abbildung 27: grafische Darstellung des TSS-Werts der Haupteinflussfaktoren aus der Varianzanalyse für die Zielgröße α_W nach Versuchsplan 1

Wechselwirkungen lassen sich ebenso darstellen. Diese Abbildungen enthalten keinen Mehrwert im wissenschaftlich-inhaltlichen Kontext; schließlich sind alle Faktoren, die den Absorptionsgrad beeinflussen, in den Tabellen der Varianzanalyse enthalten. Dennoch wird auf einen Blick deutlich, welche Faktoren oder Wechselwirkungen detaillierter betrachtet werden sollten.

Für die Faktoren Probendicke und Person wurden als einzelne Faktoren die höchsten TSS-Werte ermittelt. Demzufolge ist auch die Wechselwirkung zwischen diesen Faktoren entsprechend groß. Trotzdem ist der TSS-Wert kleiner als der für den Faktor Person ermittelte.

Die berechneten Varianzanalysen für die anderen Zielgrößen Schiefe, Wölbung, mittlere quadratische Abweichung und Mittelwert sind beispielhaft für den Versuchsplan 1 (alle Probendicken, Sägezuschnitte) in Anhang C in Tabelle C-1 bis Tabelle C-6 auf den Seiten 142 bis 147 dargestellt. Tabelle 7 zeigt zusammengefasst alle berechneten Varianzanalysen für die Sägeproben nach Versuchsplan 1. Die Probendicke hat offensichtlich den größten Einfluss auf den Absorptionsgrad. Die Reihung der folgenden Faktoren ist abhängig von der Zielgröße. Abgesehen von der Varianzanalyse mit der Zielgröße Schiefe zeigen alle anderen nach dem Haupteinfluss Probendicke den größten Einfluss durch die Person des Zuschnitts. Aus der Berechnung für die Zielgröße Schiefe wird klar, dass der Faktor Durchmesser signifikanter als der Faktor Person ist.

Die folgenden Tabellen beschränken sich auf die Ergebnisse der Darstellung der Haupteinflussfaktoren und betrachten die Wechselwirkungen nicht. Da, wie in Tabelle 7 bis Tabelle 9 gezeigt wird, die Probendicke dominant ist, sind auch die Wechselwirkungen mit der Probendicke sehr stark. Die genauen Ergebnisse der berechneten Varianzanalysen können Anhang C ab Seite 143 entnommen werden. Für die Tabellen wurden die TSS der Faktoren betrachtet und nach Größe sortiert. Jeder Faktor

wurde als signifikant eingestuft. Die Haupteinflussfaktoren können unabhängig von der Zielgröße sicher detektiert werden.

Tabelle 7: Zusammenfassung der Varianzanalysen für die verschiedenen Zielgrößen nach Versuchsplan 1 (alle Sägeproben); Ordnung der Faktoren nach TSS-Wert

	α_w	Mittelwert	mittlere absolute Abweichung	Varianz	Schiefe	Wölbung
1	Probendicke	Probendicke	Probendicke	Probendicke	Probendicke	Probendicke
2	Person	Person	Person	Person	Durchmesser	Person
3	Durchmesser	Durchmesser	Zuschnittsart	Zuschnittsart	Person	Durchmesser
4	Zuschnittsart	Einbau	Durchmesser	Durchmesser	Zuschnittsart	Zuschnittsart
5	Einbau	Zuschnittsart	Einbau	Einbau	Einbau	Probennummer
6	Probennummer	Probennummer	Probennummer	Probennummer	Probennummer	Einbau

Versuchsplan 2 betrachtet die extern CNC-basiert gefertigten Proben. Die einzelnen ANOVA-Tabellen, aufgeschlüsselt nach Zielgröße, sind in Anhang C ab Seite 143 präsentiert. Auch hier zeigt sich wieder, dass die Probendicke dominierend ist.

Tabelle 8: Zusammenfassung der Varianzanalysen für die verschiedenen Zielgrößen nach Versuchsplan 2 (CNC-gefertigte Proben); Ordnung der Faktoren nach TSS-Wert

	α_w	Mittelwert	mittlere absolute Abweichung	Varianz	Schiefe	Wölbung
1	Probendicke	Probendicke	Probendicke	Probendicke	Probendicke	Probendicke
2	Zuschnittsart	Durchmesser	Durchmesser	Durchmesser	Durchmesser	Durchmesser
3	Durchmesser	Zuschnittsart	Probennummer	Zuschnittsart	Zuschnittsart	Zuschnittsart
4	Probennummer	Einbaurichtung	Zuschnittsart	Einbaurichtung	Einbaurichtung	Probennummer
5	Einbaurichtung	Probennummer	Einbaurichtung	Probennummer	Einbaunummer	Einbaurichtung
6	Einbaunummer	Einbaunummer	Einbaunummer	Einbaunummer	Probennummer	Einbaunummer

Eine weitere Möglichkeit, einen vollfaktoriellen Versuchsplan zu erstellen, besteht darin, alle Proben mit einem Durchmesser von 90 mm zu betrachten, die von Person A gefertigt wurden. Tabelle 9 fasst die Reihung der Faktoren in gewohnter Form zusammen.

Tabelle 9: Zusammenfassung der Varianzanalysen für die verschiedenen Zielgrößen nach Versuchsplan 3 (Proben mit 90 mm Durchmesser); Ordnung der Faktoren nach TSS-Wert

	α_w	Mittelwert	mittlere absolute Abweichung	Varianz	Schiefe	Wölbung
1	Probendicke	Probendicke	Probendicke	Probendicke	Probendicke	Probendicke
2	Zuschnittsart	Zuschnittsart	Zuschnittsart	Zuschnittsart	Zuschnittsart	Zuschnittsart
3	Probennummer	Probennummer	Einbaurichtung	Einbaurichtung	Probennummer	Einbaurichtung
4	Einbaurichtung	Einbaurichtung	Probennummer	Probennummer	Einbaunummer	Einbaunummer
5	Einbaunummer	Einbaunummer	Einbaunummer	Einbaunummer	Einbaurichtung	Probennummer

Alle bisherigen Tabellen zeigen den Faktor Probendicke als dominanten Faktor an. Daher werden nun Varianzanalysen für die Sägeproben für jede Probendicke berechnet. Damit wird erkennbar, dass der Faktor Person einen deutlichen Einfluss auf die Zielgröße hat. Tabelle 10 und Tabelle 11 zeigen exemplarisch die Ergebnisse der Varianzanalyse für die Probendicken 30 mm und 80 mm.

Tabelle 10: Zusammenfassung der Varianzanalysen für die verschiedenen Zielgrößen nach Versuchsplan 4 (nur Sägeverfahren, Probendicke 30 mm); Ordnung der Faktoren nach TSS-Wert

	α_w	Mittelwert	mittlere absolute Abweichung	Varianz	Schiefe	Wölbung
1	Person	Durchmesser	Person	Person	Person	Person
2	Zuschnittsart	Person	Probennummer	Durchmesser	Probennummer	Zuschnittsart
3	Probennummer	Probennummer	Durchmesser	Probennummer	Durchmesser	Probennummer
4	Durchmesser	Einbaurichtung	Einbaurichtung	Einbaurichtung	Zuschnittsart	Durchmesser
5	Einbaurichtung	Zuschnittsart	Zuschnittsart	Zuschnittsart	Einbaurichtung	Einbaurichtung

Tabelle 11: Zusammenfassung der Varianzanalysen für die verschiedenen Zielgrößen nach Versuchsplan 4 (nur Sägeverfahren, Probendicke 80 mm); Ordnung der Faktoren nach TSS-Wert

	α_w	Mittelwert	mittlere absolute Abweichung	Varianz	Schiefe	Wölbung
1	Person	Person	Person	Person	Person	Person
2	Durchmesser	Durchmesser	Durchmesser	Zuschnittsart	Durchmesser	Durchmesser
3	Probennummer	Zuschnittsart	Zuschnittsart	Durchmesser	Zuschnittsart	Zuschnittsart
4	Zuschnittsart	Probennummer	Probennummer	Probennummer	Probennummer	Probennummer
5	Einbaurichtung	Einbaurichtung	Einbaurichtung	Einbaurichtung	Einbaurichtung	Einbaurichtung

Die Varianzanalyse liefert nur den Hinweis, dass ein Faktor einen Einfluss hat. Alle Haupteinflussfaktoren wurden unabhängig von der Zielgröße als theoretisch signifikant eingestuft. Da unabhängig von der gewählten Zielgröße der Haupteinflussfaktor auf die Zielgröße und auch die Faktoren mit geringerem Einfluss sicher und zumeist übereinstimmend gefunden werden können, wurde hiermit gezeigt, dass nicht unbedingt die akustische Kenngröße α_w zur Berechnung genutzt werden muss. Mögliche Fehler durch die Programmierung in der Berechnung können vermieden werden, indem standardisierte, in MATLAB bereits implementierte und geprüfte Funktionen verwendet werden. Eine geringe Varianz zwischen den Werten sorgt dafür, dass nahezu alle Faktoren, die den Absorptionsgrad beeinflussen, als signifikant eingestuft werden. Die Methode – eine Varianzanalyse zur Detektion signifikanter Einflussfaktoren auf akustische Größen zu verwenden – wurde in der Literatur nicht gefunden.

6.2.2 Effektberechnung

Die Varianzanalyse gibt erste Hinweise darauf, welche Faktoren den berechneten Absorptionsgrad beeinflussen. Bei der umfassenden Datenmenge von bis zu 123 Einzahlwerten je Versuchsplan entsteht eine große Datenbasis. Anhand des Signifikanzniveaus lässt sich nicht ableiten, wie groß der Effekt auf eine Zielgröße tatsächlich ist. Klarheit schafft erst eine Effektberechnung, in der der Effekt durch die eingetretene Änderung als Zahlenwert dargestellt wird und damit auf die praktische Bedeutsamkeit geprüft werden kann.

Typischerweise werden Effekte in Form von Boxplots dargestellt. Diese Darstellung ermöglicht es, die Lage und Streuung der Daten zu erfassen. Der eingezeichnete Median zeigt an, dass 50 % der Daten über diesem Wert und 50 % unter diesem Wert liegen. Bei perfekt normalverteilten Daten ohne Ausreißer ist der Median mit dem arithmetischen Mittelwert identisch. Die eingezeichnete Box um den Median enthält 50 % der Werte, wobei sich jeweils 25 % über oder unter dem Median befinden. Der Bereich in der Box wird als Interquartilsbereich bezeichnet. Mit zusätzlichen Whiskers (= Antennen) am Interquartilsbereich wird der Bereich gekennzeichnet, der dem 1,5-fachen Abstand des jeweiligen Interquartilsabstandes entspricht. Liegt das Minimum oder das Maximum der Werte innerhalb dieses Bereichs, werden die Whiskers entsprechend verkürzt dargestellt. Anhand der Whiskers lässt sich ebenfalls ablesen, wie groß die Streuung der Daten ist. Kurze Whiskers bedeuten dabei eine geringe Streuung der Daten um den Median. Von der Lage des Medians innerhalb des Interquartilsbereichs und der Länge der Whiskers lässt sich außerdem ableiten, ob die Daten normalverteilt oder mit einer gewissen Schiefe vorliegen.

Für die Effektberechnung werden die Daten nochmals sinnvoll gruppiert, um signifikante und praktisch bedeutsame Effekte zu ermitteln. Die Gruppierung erfolgte analog zur Berechnung der Varianzanalysen in Versuchsplänen. Die Kenngröße, die für Akustiker und Architekten oder Bauingenieure relevant ist, ist der α_W -Wert. Nachvollziehbar ist auch der Mittelwert der berechneten Absorptionsgrade, da auch er in Prozent angegeben ist. Statistische Kenngrößen, wie in der Varianzanalyse betrachtet, sind wenig greifbar, da sie keinen akustischen Bezug aufweisen. Sie können aber genau wie der Mittelwert oder α_W berechnet werden. Für jede Zielgröße, in diesem Fall also nur für den Mittelwert und die Kenngröße α_W , werden für die unterschiedlichen Faktoren Boxplots erstellt. Zusätzlich wird die eigentliche Effektberechnung durchgeführt. Aus den Boxplots lässt sich die Verteilung der Daten gut ablesen – die Effektberechnung zeigt die tatsächliche Auswirkung auf den Mittelwert der Vergleichsgruppe. Das folgende Beispiel verdeutlicht diese Aussage.

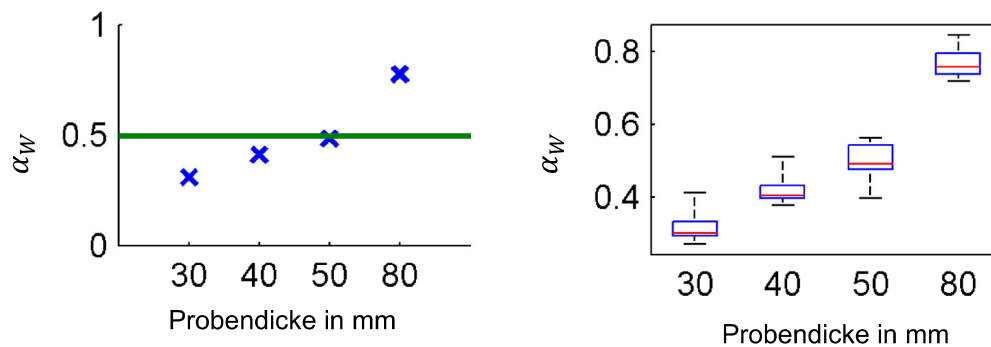


Abbildung 28: Darstellung von Effekten zur Prüfung der praktischen Signifikanz eines Effekts; Versuchsplan 3 (Probenzuschnitte mit einem Durchmesser von 90 mm extern oder von Person A gefertigt); Zielgröße α_W ; links: Effektplot, rechts: Darstellung als Boxplot

Der Effektplot und der Boxplot in Abbildung 28 zeigen für alle Proben mit einem Durchmesser von 90 mm (gefertigt von Person A oder extern) die Auswirkungen der Änderung einer Faktorstufe bei dem Faktor Probendicke auf die Zielgröße α_W . Der Mittelwert aller α_W -Werte liegt bei $\alpha_W = 0,493$ (grüne Linie, Effektplot). Der Mittelwert innerhalb der nach Probendicke sortierten Gruppen ist jeweils durch ein blaues Kreuz gekennzeichnet. Er beträgt bei den 30 mm dicken Proben 0,3119, bei den 40 mm dicken Proben 0,4183, bei den 50 mm dicken Proben 0,4877 und bei den 80 mm dicken Proben 0,755. Das bedeutet, dass bei der Zielgröße α_W die Änderung der Probendicke den Mittelwert aller Proben auf den entsprechenden Wert absenkt oder anhebt. Der Boxplot wiederum zeigt klar, wie groß die Streuung der Daten ist. Jeder Boxplot pro Probendicke zeigt 126 Datensätze, die zur Berechnung verwendet wurden (sieben Zuschnittsverfahren, zwei Einbaurichtungen, drei Prüflinge, drei Messungen). Der Median der berechneten α_W -Werte liegt bei 0,31044 – und entspricht damit nahezu dem arithmetischen Mittelwert der ebenfalls aus 126 Datensätzen berechnet wurde. Der Maximalwert bei der Kennzahl α_W lag innerhalb der 30 mm dicken Proben bei 0,42 und das Minimum bei 0,25. Aus diesen Plots ist noch nicht ablesbar, woraus diese Unterschiede zwischen Maximum und Minimum der Kennzahl resultieren.

Es ist durchaus sinnvoll, die Effektberechnungen für jeden Versuchsplan getrennt auszuwerten. Versuchsplan 1 (Abbildung C-4 auf Seite 151) enthält alle Sägezuschnitte. Abbildung 22 auf Seite 72 hilft, sich die Verschiedenartigkeit der Absorptionsgradverläufe in Abhängigkeit von der Probendicke zu verdeutlichen. Dabei variiert der Mittelwert der Zielgröße α_W in Abhängigkeit von der Probendicke. Die Probennummer verändert den Mittelwert der Zielgröße α_W nicht (siehe Effektplot).

Die Streuung bei den einzelnen Probennummern ist entsprechend groß, weil alle Probendicken darin berücksichtigt sind. Die Streuung einer Probe ist besonders groß, ein Ausreißer ist im Boxplot markiert. Den größten Effekt auf den Mittelwert der Zielgröße α_W hat, abgesehen von der Probendicke, die Person des Zuschnitts. Die berechneten Zielgrößen aus den Messungen der Proben von Person B streuen stark, wohingegen die Streuungen bei den beiden anderen Personen recht gering sind. Das

Sägeverfahren beeinflusst den in dieser Gruppe gemittelten α_W -Wert ähnlich wenig wie der Durchmesser. Noch weniger Einfluss zeigt sich nur durch die Messwiederholung oder die Einbaurichtung. Wird hingegen die Zielgröße Mittelwert beim Versuchsplan 1 (Abbildung C-5 auf Seite 152) gewählt, zeigt sich, dass der Effekt der Person ähnlich gering ist wie der Effekt der anderen Faktoren, abgesehen von der Probendicke. Die dargestellte Streuung in den Boxplots ist, analog zur Auswertung der Zielgröße α_W , groß. Beim Faktor Probendicke sind die Streuungen innerhalb der Faktorstufe 80 mm sehr gering. Die Interquartilsbox ist sehr klein und die Whiskers sind entsprechend kurz. Werden nun zusätzlich die extern gefertigten Proben in die Untersuchung aufgenommen, zeigt sich ein ähnliches Bild (Abbildung C-6 auf Seite 153). Die Probendicke beeinflusst die ausgewählte Zielgröße am stärksten. Die Probennummer, Einbaurichtung und Messung haben keinen signifikanten Einfluss auf den berechneten Einzahlwert. Durch die Person der Fertigung entsteht kein praxisrelevanter Effekt auf den Einzahlwert. Der Mittelwert der Zielgröße ändert sich um maximal 0,004 %, abhängig davon, welche Person die Prüflinge gefertigt hat. Die Fertigung des Prüflings beeinflusst den errechneten Mittelwert der Zielgröße um etwa 0,2 %. Dieser Effekt ist mit etwa 1 % bei α_W als Zielgröße stärker ausgeprägt. Der Mittelwert (Abbildung C-7 auf Seite 154) gibt damit als Zielgröße keine relevante Änderung des Absorptionsgrades aus, obwohl die Abhängigkeit vom Zuschnittsverfahren in der grafischen Darstellung der Absorptionsgradverläufe durchaus sichtbar ist, wie in Abschnitt 6.1 gezeigt. Die Streuungen in den Boxplots sind groß, da alle Probendicken berücksichtigt worden sind.

Der Zuschnitt mit einem rotierenden Messer beeinflusst den Mittelwert der berechneten Zielgröße in Versuchsplan 3 neben der Probendicke am stärksten (Abbildung C-8 auf Seite 155 und Abbildung C-9 auf Seite 156). Berücksichtigt werden diesmal nur Zuschnitte von Person A – das umfasst die Sägezuschnitte und den Messerzuschnitt. Der Effekt durch den Zuschnitt ist bei allen Zuschnittsarten etwa gleich groß, wohingegen der Zuschnitt mit dem rotierenden Messer den Mittelwert der Zielgröße α_W stark absenkt. Die Mediane der verschiedenen Zuschnittsarten unterscheiden sich stark voneinander; die Streubreite ist bei allen Verfahren, außer dem SSH-Verfahren, gleich. Der Mittelwert lässt auf keinen praxisrelevanten Effekt durch den Zuschnitt mit dem rotierenden Messer schließen, was sich auch in den Boxplots widerspiegelt.

Aufgeschlüsselt nach Probendicke, dargestellt beispielhaft in Abbildung 28 (zusätzlich Abbildung C-10 auf Seite 157 und Abbildung C-11 auf Seite 158), ergibt sich nun ein klareres Bild. Bei der Probendicke 30 mm ist der Effekt durch die Person des Zuschnitts genauso groß wie der Effekt durch den Zuschnitt selbst, nämlich etwa 1,5 %. Der Median aller drei anhand der Durchmesser gebildeten Gruppen ist annähernd gleich, was bedeutet, dass der Durchmesser keinen nachweisbaren Effekt auf die Zielgröße α_W hat. Das ist auch in der Effektberechnung zu sehen: Der Mittelwert der Zielgröße ändert sich um 0,2 %. Das Gleiche zeigt sich auch bei der Zielgröße Mittelwert, wenn auch hier der Einfluss mit 1 % größer ist. Dennoch kann bei beiden Effekten NICHT von einem

praxisrelevanten Effekt gesprochen werden. Der Effekt durch die Person ist etwa genauso groß. Betrachtet man die zugehörigen Boxplots, wird jedoch klar, dass der Effekt durch Person C viel stärker ist (Abbildung C-11 auf Seite 158). Der Median der Gruppen „Person A“ und „Person B“ ist identisch, wohingegen der Median der Gruppe „Person C“ vergleichsweise deutlich erhöht ist. Der Interquartilsbereich ist ebenfalls größer (Abbildung 28). Auch bei der Probendicke 40 mm hat die Person den größten Effekt (Abbildung C-12 auf Seite 159 und Abbildung C-13 auf Seite 160). Der Boxplot zeigt hier sehr deutlich, dass die Mediane der Gruppen „Person“ sich voneinander unterscheiden und auch die Interquartilsbereiche nicht die gleiche Lage haben. Die Effekte Probendurchmesser, Zuschnittsverfahren, Einbaurichtung, Probennummer und Messungsnummer zeigen keine praxisrelevanten Ergebnisse. Diese Beobachtungen zeigen sich auch beim 50 mm dicken Material (Abbildung C-14 auf Seite 161 und Abbildung C-15 auf Seite 162). Auffällig hier ist die große Streubreite von 15 % bei der Messungsnummer, der Probennummer, der Einbausituation und auch dem Durchmesser. Alle diese Faktoren zeigen geringe, nicht praxisrelevante Effekte in der Effektberechnung, weisen aber eine große Streubreite in den Boxplots auf. Wieder ist der Zuschnitt durch die Person der Faktor mit dem größten Effekt. Bezogen auf den gemittelten α_w -Wert beträgt die Abweichung bis zu 5 %, untereinander bis zu 7 %. Der Faktor Zuschnittsart verhält sich ebenso. Allerdings liegen die Mediane der Boxplots hier viel näher beieinander, die Interquartilsbereiche haben eine ähnliche Lage und die Streuungen sind vergleichbar.

Im Vergleich zu den 30 mm und den 40 mm dicken Proben sind die Streuungen bei den 80 mm dicken Proben (Abbildung C-16 auf Seite 163 und Abbildung C-17 auf Seite 164) sehr groß. Die Effekte durch die unterschiedlichen Personen unterscheiden sich um 15 % voneinander. Andere Effekte treten dadurch bei dieser Probendicke deutlich in den Hintergrund. Die Mediane der Gruppen „Person“ liegen bis zu 25 % auseinander, die Interquartilsbereiche überlappen sich nicht und die jeweiligen Streuungen sind gering. Der Maximalwert und der Minimalwert beim Fertigungsverfahren SLF (Säge, langsam, Führung) liegen 30 % auseinander. Streuungen bei den anderen Fertigungsbereichen sind mit etwa 5 % wesentlich geringer. In nahezu jedem Boxplot zu dieser Zielgröße innerhalb dieses Versuchsplans ist ein Ausreißer zu sehen. Der Prüfling wurde identifiziert und erneut in Augenschein genommen. Es konnten keine offensichtlichen Abweichungen an der Rundheit, Rechtwinkligkeit und Schnittkantenbeschaffenheit festgestellt werden. Da keine offensichtlichen Einflüsse aus dem Zuschnitt erkannt werden konnten, wird bei dieser Materialprobe eine Materialinhomogenität angenommen.

Für die Versuchspläne 4 bis 7, also die nach Probendicke aufgeschlüsselten Pläne, wurde bisher nur die Zielgröße α_w diskutiert. Die Auswertung des Mittelwerts der berechneten Absorptionsgrade zeigt ähnliche Ergebnisse (Abbildung C-11–Abbildung C-17 auf Seite 158–164). Die Zielgröße Mittelwert reagiert auf Änderungen weniger sensitiv. Die einzelnen Zuschnittsverfahren unterscheiden sich

beim 40 mm dicken Material untereinander um maximal 2 %. Zum Mittelwert aller Zuschnittsverfahren beträgt die Abweichung weniger als 1 %. Die Streuung der Werte ist allerdings mit 15 % beim Zuschnittsverfahren recht groß. Die berechneten Streuungen von 15 % in der Proben- und Messungsnummer erscheinen sehr hoch. Die Effektberechnung zeigt durch die berechneten Mittelwerte innerhalb der jeweiligen Gruppe „Zuschnittsverfahren“ Effekte von weniger als 1 % Abweichung relativ zueinander. Der Mittelwert der Gruppenmittelwerte wird entsprechend weniger beeinflusst. Ein praxisrelevanter Effekt kann damit bei dieser Probendicke ausgeschlossen werden. Auch die Streuungen innerhalb der Gruppen „Zuschnittsverfahren“ sind mit 6 % gering und vergleichbar mit denen der anderen Faktoren. Das 80 mm dicke Material zeigt, dass die Effekte mit zunehmender Probendicke wesentlich geringer ausfallen. Die Mittelwerte durch die Person unterscheiden sich nur noch um maximal 3 % voneinander. Die Abweichungen zum Mittelwert der Zielgröße Mittelwert (innerhalb des Faktors Person) ist mit maximal 2 % sehr gering. Für das Zuschnittsverfahren kann die gleiche Aussage getroffen werden. Die Streuungen innerhalb der Faktoren, sichtbar an den Boxplots, sind mit 3 %, verglichen mit anderen Probendicken, sehr gering.

6.3 Fazit

Ein visueller Vergleich von Absorptionsgradspektren ist hilfreich, weil auch kleine Unterschiede zwischen den zu vergleichenden Spektren sichtbar werden. Für globalere Aussagen, die mithilfe der Einzahlwerte getroffen werden können, bietet sich die Analyse der Messdaten mithilfe der Varianzanalyse an. Eine Aussage über die Höhe eines einzelnen Einflusses, ähnlich der Effektberechnung, kann durch den visuellen Vergleich verschiedener berechneter Absorptionsgradverläufe nicht pauschal, sondern nur in Zusammenhang mit dem durch Abweichungen betroffenen Frequenzbereich getroffen werden.

Nicht alle im Eingang des Kapitels auf Seite 65 aufgestellten Hypothesen können verifiziert oder falsifiziert werden. Eine eindeutig verifizierte Hypothese ist, dass die Schallabsorption mit zunehmender Probendicke zunimmt. Falsifiziert werden mussten die Hypothesen zum Lerneffekt und zur Messungsnummer. Weder unterscheidet sich die erste Messung einer Probe von der letzten Messung einer Probe, noch kann im Spektrum oder mithilfe der Einzahlwerte α_w und Mittelwert ein Unterschied in den Kenngrößen zwischen der ersten und der zuletzt gefertigten Probe gezeigt werden.

Aus der Literatur ist bekannt, dass der Durchmesser der Probe einen Einfluss auf den berechneten Absorptionsgrad hat. Unklar ist allerdings, wie groß der Einfluss ist; zudem besteht Uneinigkeit darüber, ob die Materialprobe größer oder kleiner als der Durchmesser des Kundt'schen Rohres gefertigt werden sollte. Aus dem visuellen Vergleich der berechneten Absorptionsgradkurven kann bestätigt werden, dass – in der Literatur vorgeschlagene – Anpassungen des Durchmessers im Bereich von 1 % größer/kleiner als der Innendurchmesser des Probenhalters das Spektrum des Absorptionsgrades

ändern. In der Varianzanalyse wird dieser Faktor als signifikant eingestuft; die Effektberechnung zeigt ebenfalls in Abhängigkeit vom Zuschnittsverfahren signifikante Effekte. Diese Hypothese ist damit verifiziert.

Beim Sägezuschnitt scheint die Verwendung einer Führung bei dicken Materialproben beim Zuschnitt zu helfen, um die Abweichungen zwischen den einzelnen berechneten Absorptionsgraden zu verringern. Dabei spielt die Erfahrung der Person keine Rolle mehr. Mit zunehmender Materialdicke nimmt auch der Einfluss des Zuschnittsverfahrens auf den Absorptionsgrad ab. Zwischen den verschiedenen Sägeverfahren ist kein Unterschied mehr zu erkennen, wenn nur die Abhängigkeit von der Materialdicke betrachtet wird – eine Beobachtung, die durch die Varianzanalyse mit der Effektberechnung gestützt wird. Wird zusätzlich getrennt nach dem Probendurchmesser analysiert, zeigen sich große Unterschiede von bis zu 10 % zwischen Absorptionsgradspektren der verschiedenen Zuschnittsvarianten. Eine klare Aussage, dass ein bestimmtes Fertigungsverfahren zu einem maximalen Absorptionsgrad bei der Berechnung führt, kann aber nicht getroffen werden. Andererseits sind die Effekte auf die Einzahlwerte in der Praxis klein, sodass, zumindest hinsichtlich der Einzahlwerte, auch der Einfluss des Zuschnitts auf den Absorptionsgrad vernachlässigt werden kann. Es kann nicht gezeigt werden, dass die CNC-gesteuerten Verfahren HZD und WSS deckungsgleiche Absorptionsgradspektren liefern, obwohl der Faktor „für die Fertigung verantwortliche Person“ im Prinzip nicht existiert. Vermutet wird eine Materialinhomogenität in der Schaumstoffprobe, da auch die Schnittkanten beider Verfahren glatt und nicht gerissen sind. Die Berechnung der Zielgröße α_W aus den vorliegenden Absorptionsgradspektren ist nur eingeschränkt empfehlenswert, weil nicht der komplette Frequenzbereich der Referenzkurve nach Norm abgedeckt wird. Dass die Ergebnisse der Varianzanalyse und der Effektberechnung dennoch mit denen anderer Zielgrößen übereinstimmen, zeigt aber, dass zumindest die Tendenz erkennbar ist und signifikante Faktoren trotzdem identifiziert werden können. In Tabelle 12 werden die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst.

Tabelle 12: Zusammenfassung der Einflüsse durch die Faktoren auf das Absorptionsgradspektrum und Einzahlwerte

Einflussfaktor	Einfluss auf das Spektrum des Absorptionsgrades	Einfluss auf Einzahlwerte
Proben- dicke	- Maximum des Schallabsorptionsgrades wird bei anderen Frequenzen erreicht	- größter Effekt durch den Faktor Probendicke auf Einzahlwerte
Zuschnitt	<ul style="list-style-type: none"> - Mittelung aller Absorptionsgradspektren eines Zuschnitts (getrennt nach Probendicke) zeigt bei 30 mm Probendicke Differenzen von 4 % bei einzelnen Frequenzen/Frequenzbereichen zwischen den Sägezuschnitten; bei größeren Materialdicken keine Auswirkungen - Mittelung der Absorptionsgrade (getrennt nach Probendicke und Durchmesser) zeigt Unterschiede von bis zu 10 % bei einzelnen Frequenzen/Frequenzbereichen zwischen verschiedenen Zuschnittsverfahren - Zuschnittsverfahren kann die Frequenz, bei der das Maximum der Schallabsorption auftritt, beeinflussen (vermutete Materialinhomogenität) 	<ul style="list-style-type: none"> - Effekt durch Änderung des Probenzuschnitts (Sägeverfahren) maximal 1 % für die Zielgröße Mittelwert - Effekt durch Änderung des Probenzuschnitts (Sägeverfahren) maximal 1 % für die Zielgröße α_W, Ausnahme: Zuschnitt MES (Versuchsplan 3): Ursache: Verteilung der berechneten Einzahlwerte ist linksschief, sichtbar im Boxplot durch Länge der Whiskers und die Lage des Medians
Proben- durchmes- ser	- kein Einfluss des Faktors Durchmesser auf das Absorptionsgradspektrum bei großen Materialdicken erkennbar	- Effekt durch Änderung des Probendurchmessers maximal 1,2 % bezogen auf 90 mm für die Zielgrößen Mittelwert und α_W
Einbaurich- tung	- Abweichungen von 3 % bei einzelnen Frequenzen/Frequenzbereichen bei den 30 mm dicken Proben	- Effekt durch Einbaurichtung < 1 % auf die Zielgrößen Mittelwert und α_W
Proben- nummer	<ul style="list-style-type: none"> - Einfluss kann nicht eindeutig belegt werden, Auswertungen sind überlagert von anderen Faktoren (alle Sägezuschnitte gemittelt) - kein nachweisbarer „Lerneffekt“ 	- Effekt durch Probennummer < 1 % auf die Zielgrößen Mittelwert und α_W

Einflussfaktor	Einfluss auf das Spektrum des Absorptionsgrades	Einfluss auf Einzahlwerte
Person	<ul style="list-style-type: none"> - Mittelung aller Absorptionsgradspektren von Proben, die von einer Person (und extern) gefertigt wurden (getrennt nach Probendicke), zeigt Differenzen von 5 % bei einzelnen Frequenzen/Frequenzbereichen zwischen den Zuschnitten verschiedener Personen/extern - Mittelung der Absorptionsgrade (getrennt nach Probendicke und Durchmesser) zeigt Unterschiede bis zu 12 % bei einzelnen Frequenzen/Frequenzbereichen zwischen verschiedenen Personen/extern - Die Abweichungen zwischen gemittelten Absorptionsgradspektren (getrennt nach Probendicke und Durchmesser), ausgewertet für jede Person, sind bei höherer Erfahrung mit der Probenfertigung geringer - Absorptionsgradspektren, ermittelt an WSS- und HZD-gefertigten Proben, sind nicht identisch <ul style="list-style-type: none"> – trotz des fehlenden Einflusses des Faktors Mensch, konkrete Art der Probenfertigung mit HZD ist nicht bekannt, vermutet wird Materialinhomogenität in den mit WSS gefertigten Proben 	<ul style="list-style-type: none"> - Effekte durch Zuschnitte von Person A und C auf den Mittelwert der Zielgröße Mittelwert $< 0,5 \%$; Änderung durch Probenfertigung von Person C um etwa 1 % - Der Unterschied zwischen den Mittelwerten für die berechnete Zielgröße Mittelwert zwischen extern gefertigten Proben und Proben, die von Person A gefertigt wurden, mit $< 0,5 \%$ vernachlässigbar - Zuschnitt von Person A und C liegen etwa 3 % über Mittelwert der Zielgröße α_W; Zuschnitte von Person B etwa 6 % unter dem Mittelwert der Zielgröße α_W bei Betrachtung aller Faktoren im Versuchsplan 1 - Der Unterschied zwischen den Mittelwerten für die berechnete Zielgröße α_W zwischen extern gefertigten Proben und Proben, die von Person A gefertigt wurden, mit $< 0,5 \%$ vernachlässigbar - Die Auswertung – getrennt nach Probendicke – zeigt, dass der Effekt durch die zuschneidende Person bei Person B deutlich größer ist, als durch Effekte bei Zuschnitten von Personen mit mehr Erfahrung in Probenfertigung

7 Validierung der Messungen an einem Messsystem eines anderen Herstellers zur Bestimmung des Schallabsorptionsgradspektrums

Durch die am Fachgebiet SAM programmierte Software kann zum einen der Verdacht aufkommen, dass die beschriebenen Effekte nur an diesem einen Messsystem auftreten und daher ein Softwarefehler vorliegt, der durch eine falsche Bedienung des Messsystems zu falschen Berechnungsergebnissen führt. Zum anderen kann das Messsystem selbst infrage gestellt werden. Um diesen Verdacht zu entschärfen, wurden Messungen an einem kommerziellen Messsystem eines anderen Herstellers mit kommerzieller Software durchgeführt. Das System stand nur für kurze Zeit zur Verfügung, sodass eine umfangreiche Untersuchung wie in Kapitel 6 nicht durchgeführt werden konnte. Der Aufbau des Rohres ist sonst identisch mit dem des für diese Dissertation verwendeten. Es wurde der gleiche Schaumstoff vermessen wie jener, der für diese Dissertation verwendet wurde. Der Durchmesser des Rohres betrug allerdings 100 mm, weshalb es unmöglich war, dieselben Proben für die Untersuchung zu nutzen und eine neue Probe angefertigt werden musste. Auf die Anfertigung mehrerer Proben wurden verzichtet, weil das Messsystem nur für einen kurzen Zeitraum genutzt werden konnte. Von Person A wurde aus dem 40 mm dicken Material eine Rundprobe nach dem SSF-Verfahren gefertigt. Person A wurde als zuschneidende Person gewählt, weil sie über die größte Erfahrung beim Probenzuschnitt verfügt. Die Grenzfrequenz des Rohres liegt bei 1715 Hz nach Gleichung (2.31) und bei 1972 Hz nach Gleichung (2.30). Die Auswertung der Messsignale erfolgt aufgrund des verwendeten Signalfilters nur bis 1600 Hz⁶.

Das Vorgehen bei den Messungen entsprach dem Vorgehen bei den Messungen am Kundt'schen Rohr am Fachgebiet SAM: Nach der Kalibration des Messsystems wurde der Stempel im Probenhalter auf die Probendicke von 40 mm eingestellt, die Probe eingesetzt und der Messvorgang gestartet. Geprüft wurde die Abhängigkeit des Absorptionsgrades von der Drehung der Schaumstoffprobe im Probenhalter, da durch diese Messungen eine große Datenbasis entstand. Die Probe wurde in den Probenhalter eingesetzt, vermessen und um 10° verdreht wieder eingesetzt. Es zeigt sich, dass der Effekt durch die Drehung der Probe nicht nur bei den Messungen am Fachgebiet SAM auftritt, sondern auch in dem anderen Messsystem. Auffällig ist außerdem, dass die Messungen am Fachgebiet SAM deutlich verrauschter sind als die Messungen mit dem kommerziellen Messsystem, bei dem eine Signalglättung durch Mittelungsverfahren implementiert ist.⁶ Die berechneten Absorptionsgrade am Fachgebiet SAM liegen um 5 % im tieffrequenten Bereich (500 Hz bis 700 Hz) höher als die am vergleichbaren Messsystem ermittelten. Im hochfrequenten Bereich (bei 1300 Hz) gibt es Unterschiede von bis zu 10 % zwischen den berechneten Absorptionsgraden aus Messungen an beiden Messsystemen. Der grundsätzliche Verlauf ist allerdings ähnlich (vergleiche Abbildung B-44 auf Seite 142).

⁶ mündliche Information von Herrn Briele, Brüel & Kjær am 20.10.2016.

Das heißt, dass es allein durch die Verwendung eines anderen Messsystems zu gravierenden Unterschieden beim berechneten Absorptionsgrad kommen kann. Unsicherheitsfaktoren sind die Bedienung der Software, die Mikrofontiefe im Rohr und das Einsetzen der Probe. Von weiteren Vergleichsuntersuchungen an diesem Messsystem wird Abstand genommen, da die Unterschiede zu groß sind. Bisherige Reihenuntersuchungen von HOROSHENKOV ET AL. [11] bestätigen die Tatsache, dass zwischen den Messsystemen große Unterschiede bestehen. Es kann, basierend auf dem Nachweis des Dreheffekts, davon ausgegangen werden, dass die Unterschiede in den berechneten Absorptionsgraden durch die verschieden hergestellten Prüflinge auch in anderen Messsystemen nachweisbar sind. Außerdem bestätigen diese Messungen die Vermutung, dass durch die Aufschäumung und das anschließende Zuschneiden der Plattenware eine Materialinhomogenität vorliegt.

Die Ergebnisse der am Fachgebiet SAM durchgeführten Messungen und Berechnungen mit dem Messsystem von Thomas Schösser Messtechnik und der auf MATLAB basierenden Software zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen zur Berechnung der Absorptionsgradspektrums aus den Materialmodellen. Das bedeutet allerdings auch, dass die in diesem Kapitel vorgestellten Messungen und Ergebnisse am externen Messsystem unsicherheitsbehaftet sind.

Zu Beginn der Arbeit wurde die Bedeutung der Grenzfrequenzen erarbeitet. Die Berechnung der Grenzfrequenzen am Kundt'schen Rohr ist zwar bekannt, jedoch werden sie und damit der Gültigkeitsbereich der Messungen kaum in Veröffentlichungen genannt – obwohl einen Teil der Unsicherheitsbetrachtung am Messsystem darstellen. Auf dem Markt ist derzeit ein Kundt'sches Rohr mit zugehöriger Software zur Auswertung der Messungen erhältlich, das den Messbereich des Systems deutlich erweitert⁷, indem die Sperrfrequenz des Rohres sowie weitere modale Grenzfrequenzen wahrscheinlich durch Mittelung über benachbarte Werte oder Interpolation eliminiert werden. Bei dem zur Validierung der Messwerte genutzten kommerziellen System wird die mögliche obere Grenzfrequenz nicht erreicht, weil dies durch die Signalfilter verhindert wird.

⁷ <https://bksv.com/de-DE/products/transducers/acoustic/Acoustic-material-testing-kits/transmission-loss-and-impedance-tube-kits-4206>; abgerufen am 22.01.2019.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Ausgehend vom Hinweis in der Norm [6]: „Der Prüfling muss gut in den Halter passen“ sollte es möglich sein, reproduzierbare, von anderen Faktoren unabhängige und übereinstimmende Absorptionsgradspektren zu bestimmen. Zahlreiche Veröffentlichungen und eigene Untersuchungen belegen, dass dies nicht zutrifft.

Diese Arbeit beschreibt daher die Unsicherheit bei der Bestimmung des Schallabsorptionsgrades mithilfe des Kundt'schen Rohres, die – sofern sie bei zukünftigen Messungen beachtet wird – zu einer Vergleichbarkeit von Schallabsorptionsgradspektren, die von verschiedenen Laboratorien ermittelt wurden, führt. Wichtig sind die Erkenntnisse der Arbeit auch für die Industrie, in der bestimmte Zielkurven für den Absorptionsgrad eingehalten werden müssen. Aus den Erkenntnissen abgeleitete Anforderungen an das Vorgehen bei der Bestimmung der Schallabsorption im Kundt'schen Rohr, beispielsweise hinsichtlich Probenfertigung, erhöhen die Vergleichbarkeit von Absorptionsgradspektren und führen dadurch dazu, dass die Einhaltung von Zielwertvorgaben überprüfbar ist. Für die Bauakustik ist die Kenntnis des exakten frequenzabhängigen Verlaufes des Absorptionsgrades nicht von vordergründiger Bedeutung. Gerechnet wird in diesem Bereich meistens mit einem Einzahlwert, der aus dem frequenzabhängigen Spektrum und einer genormten Referenzkurve ermittelt werden kann.

In dieser Arbeit werden durch eine systematische Untersuchung des Kundt'schen Rohres einschließlich der Fertigung und des Einbaues der zu vermessenden Proben Faktoren identifiziert, die das Ergebnis des berechneten Absorptionsgrades beeinflussen. Der Ansatz, dafür statistische Methoden zur Versuchsplanung und zur Auswertung zu nutzen, ist in der Literatur bisher nicht beschrieben. Durch die statistische Versuchsplanung zur Untersuchung von Faktoren mit Einfluss auf das Absorptionsgradspektrum wurde eine Datenbasis geschaffen, mit der unter Verwendung von Mittelungsverfahren bei der Berechnung von Absorptionsgradspektren, eine Unterscheidung bei der Streuung von Ergebnissen zwischen zufälligen und tatsächlichen Effekten ermöglicht wird.

Für die Auswertung der Datenbasis hinsichtlich der Berechnung der Einzahlwerte, der Prüfung von Faktoren auf Signifikanz und der anschließenden Effektberechnung zur Identifikation der Höhe des Einflusses eines Faktors wurden diese Methoden zuvor noch nicht genutzt.

Es ist keine Veröffentlichung bekannt, in der die Gründe der Unsicherheit bei der Bestimmung des Schallabsorptionsgrades im Kundt'schen Rohr systematisch und umfänglich untersucht werden. Der Durchmesser der Probe ist der einzige Faktor, der in der Literatur diskutiert wird. Die Untersuchungen in dieser Dissertation sind weitaus umfänglicher. Im Gegensatz zu den Untersuchungen in der Literatur, bei denen beispielsweise durch Reihenuntersuchungen an verschiedenen Laboratorien diverse Faktoren überlagert sind und daher die Ursachen von Abweichungen der Ergebnisse

untereinander nicht geklärt werden können, wurden die Untersuchungen zur Identifikation der Faktoren, die das Ergebnis eines berechneten Absorptionsgradspektrums beeinflussen, in dieser Dissertation an **einem** Kundt'schen Rohr mit **einem** Schaumstoff durchgeführt.

Die Forschungsfragen, welche Faktoren den Absorptionsgrad beeinflussen und ob dies mithilfe statistischer Methoden geklärt werden kann, können eindeutig beantwortet werden. Folgende Faktoren und deren Einfluss auf den Absorptionsgrad aus dem Bereich Probenfertigung und Probeneinbau wurden durch das systematische Vorgehen identifiziert und mithilfe der statistischen Versuchsplanning in einer strukturierten Reihenuntersuchung untersucht: Probendicke, Probendurchmesser, Art des Probenzuschnitts, Person für den Probenzuschnitt, Einbaurichtung, Nummer der Probe und Nummer der Messung. Bei der Auswertung der in Abhängigkeit von der Frequenz vorliegenden Absorptionsgradspektren werden Abweichungen zwischen den gemittelten Absorptionsgradspektren sichtbar, die nur in einzelnen Frequenzbereichen auftreten. Einzahlwerte, berechnet aus Absorptionsgradspektren, hingegen lassen diese Schlüsse nicht mehr zu. Folgende Einzahlwerte wurden untersucht: α_W -Wert (bekannt aus der Literatur und praxisrelevant), Mittelwert, mittlere absolute Abweichung, Varianz, Wölbung und Schiefe. Mit allen Zielgrößen werden die Faktoren mit signifikantem Einfluss auf den Absorptionsgrad sicher in den Berechnungen der Varianzanalysen identifiziert.

Verschiedene Hypothesen wurden aufgestellt, von denen einige verifiziert, andere falsifiziert werden konnten. Verifiziert wurde, dass die Probendicke den Absorptionsgrad beeinflusst. Dies ist sowohl im Spektrum des Absorptionsgrades deutlich erkennbar – 80 mm dicke Materialproben weisen bereits ab etwa 1050 Hz einen maximalen Schallabsorptionsgrad von 0,98 auf, wohingegen der Schallabsorptionsgrad der 30 mm dicken Proben bei der oberen Grenzfrequenz des Rohres von 1888 Hz nur bei etwa 0,7 liegt – als auch durch die Varianzanalyse und die Effektberechnung bei der Betrachtung der Einzahlwerte, unabhängig vom ausgewählten Einzahlwert.

Eine der bemerkenswertesten Erkenntnisse in dieser Dissertation ist, dass der Faktor Probendurchmesser den Absorptionsgrad beeinflusst – die Hypothese allerdings nur teilweise verifiziert werden kann. Die Abweichungen zwischen verschiedenen Absorptionsgradspektren nehmen mit zunehmender Probendicke zu; die Hypothese wird bei der Auswertung der Absorptionsgradspektren verifiziert. Die Hypothese wird allerdings falsifiziert, wenn für die Auswertung **Einzahlwerte** genutzt werden. Anhand der Effektberechnung ist klar ersichtlich, dass der Einfluss der Faktors Probendurchmesser auf die Zielgröße nicht praxisrelevant ist.

Besonders hervorzuheben ist außerdem, dass die Erfahrung der Person, die die Proben an der Bandsäge zuschneidet, essenziell für die Ergebnisse ist. Das betrifft einerseits die Wahrung der Form (Rechtwinkligkeit, Anschnittskerbe), andererseits die Maßhaltigkeit des Durchmessers. Der Einfluss des Faktors Mensch auf das Spektrum des Schallabsorptionsgrades und die Effekte auf Einzahlwerte sind deutlich erkennbar. Absorptionsgradspektren von Proben, die mithilfe CNC-gestützter Verfahren

und an der Bandsäge gefertigt wurden, können sich deutlich voneinander unterscheiden – diese Hypothese wird also verifiziert. Bei den Einzahlwerten ist kein praxisrelevanter Einfluss durch das Zuschnittsverfahren erkennbar, wenn die Person, die die Proben an der Bandsäge fertigt, ein hohes Maß an Erfahrung hat. Die Hypothese wird folglich – bei der Auswertung der Einzahlwerte – verworfen. Eine klare Aussage darüber, ob anhand von Proben, die mit einem bestimmten Zuschnittsverfahren gefertigt wurden, der maximale Absorptionsgrad berechnet werden kann, kann nicht getroffen werden.

Die Hypothesen, dass die Faktoren Montagerichtung und Reihenfolge der gefertigten Proben einen Einfluss auf den berechneten Absorptionsgrad haben, konnten falsifiziert werden. Ein vermuteter „Lerneffekt“ beim Probenzuschnitt konnte nicht nachgewiesen werden. Die Montagerichtung war nur bei der Auswertung der Absorptionsgradspektren der 30 mm dicken Materialproben auffällig, nicht aber bei anderen Probendicken. Die Ursachen dafür könnten in weiteren Schritten erforscht werden.

Erstmals ist es nun möglich, Unsicherheit bei der Bestimmung der Schallabsorption im Kundt'schen Rohr zu beschreiben und die Effekte auf Einzahlwerte in Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren und die Änderungen des Absorptionsgradspektrums durch verschiedene Faktoren zu quantifizieren.

Ausgehend von den Absorptionsgradspektren kann keine eindeutige Aussage über eine maximale Fehlergrenze getroffen werden. Bei vorliegenden Spektren, die durch Messungen an Schaumstoffproben ermittelt wurden, sollte in einem ersten Schritt überprüft werden, ob das Maximum der Schallabsorption mit dem aus Materialmodellen berechneten übereinstimmt.

Mit zunehmender Frequenz nimmt auch die Höhe des Absorptionsgrades zu. Unterscheiden sich zwei berechnete Absorptionsgradverläufe des gleichen Materials in dem Bereich, bevor das Maximum der Schallabsorption erreicht wird, kann davon ausgegangen werden, dass verschiedene Zuschnittsarten verwendet wurden und/oder unterschiedliche Personen die Probe gefertigt haben. Die Abweichungen können bis zu 7 % betragen – weshalb bei Darstellungen des Absorptionsgradspektrums eine untere Fehlergrenze von jeweils 7 % unter dem pro Frequenzstützstelle berechneten Absorptionsgrades angenommen werden sollte. Die obere Fehlergrenze sollte ein aus dem JCA-Modell berechnetes Absorptionsgradspektrum sein.

Bei der Reduktion auf Einzahlwerte lassen sich vor allem bei dem Faktor Mensch große Streubreiten (dargestellt in den Boxplots) von bis zu 10 % erkennen. Die untere Fehlergrenze sollte 5 % geringer sein als der angegebene Einzahlwert, um die geforderte Absorption sicher einhalten zu können. Die Streuungen durch das Zuschnittsverfahren betreffen eher die obere Fehlergrenze und sind daher für die sichere Auslegung von Schallabsorptionsmaßnahmen in Räumen unkritisch.

Einen beherrschbaren Teil der Unsicherheit stellen Faktoren dar, die den Absorptionsgrad beeinflussen, aber eng mit der Funktionsweise des Kundt'schen Rohres verknüpft sind. Hier sind die Grenzfrequenz und der Abstand der Mikrofone zu nennen. Diese beiden Faktoren werden in Veröffentlichungen nicht angegeben. Beide Faktoren sind allerdings unerlässlich, um den Gültigkeitsbereich des Kundt'schen Rohrs anzugeben. Die untere Grenzfrequenz des Rohres wird mithilfe des Abstandes der Mikrofone zueinander berechnet. Für die obere Grenzfrequenz, auch „Cut-on“-Frequenz genannt, existieren mehrere Gleichungen in der Literatur, durch deren Verwendung der Messbereich – verglichen mit anderen Gleichungen zur Berechnung der „Cut-on“-Frequenz – um bis zu 15 % erweitert werden kann. Diese offensichtliche Unsicherheit bei der Auswertung und die daraus resultierende Unsicherheit beim Vergleich von Messungen aus verschiedenen Laboratorien, bei denen der Rohrdurchmesser nicht angegeben war, wurden deshalb ausführlich diskutiert.

In dieser Dissertation liegt der Schwerpunkt auf der Bestimmung der Unsicherheit bei der Ermittlung der Schallabsorption im Kundt'schen Rohr. Folgeuntersuchungen könnten die Auswirkungen der bereits identifizierten Faktoren auf den Real- und Imaginärteil der Impedanz untersuchen. In der Bauakustik und der Industrie liegt der Fokus allerdings auf dem Schallabsorptionsgrad, weshalb dieser für die Betrachtungen zur Unsicherheit ausgewählt wurde.

Ausgehend von den Ergebnissen in dieser Dissertation wird empfohlen, Prüflinge mit dem Wasserstrahlzusschnittsverfahren zu fertigen. Durch die CNC-Fertigung kann der menschliche Einfluss bei der Probenfertigung ausgeschlossen werden. Der Durchmesser der Probe sollte dem Innendurchmesser des Kundt'schen Rohres entsprechen, ein Übermaß sollte vermieden werden. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Montagerichtung keinen Einfluss besitzt. Die Ergebnisse der aus den Messungen berechneten Absorptionsgrade sollten mit denen aus Materialmodellen verglichen werden. Bei Schaumstoffen bietet sich dafür das JCA-Modell an. Liegen die Absorptionsgrade als Einzahlwerte vor, so sollte zur Sicherheit ein um 5 % geringerer Einzahlwert angenommen werden. Damit lässt sich die mögliche Unsicherheit aus der Messung und der anschließenden Berechnung des Absorptionsgrades abdecken.

Eine durch Materialinhomogenitäten bedingte Unsicherheit konnte nicht abschließend untersucht werden. Diese wurden als Ursache von Streuungen bei den berechneten Absorptionsgraden bestimmt, bei denen entweder die Probe im Probenhalter oder der Probenhalter selbst um die Rohrachse gedreht wurde. Da mathematische Ursachen, wie eine Modenbildung im Rohr, ausgeschlossen werden können, muss die Ursache für dieses Phänomen im Schaumstoff selbst liegen – in Form der Materialinhomogenität. Hierin liegt weiteres Forschungspotenzial, um die genaue Ursache der „Dreheffekte“ zu finden.

Messsysteme verschiedener Hersteller liefern nicht die gleichen Ergebnisse, wie aus der Literatur bekannt ist und auch in der Dissertation gezeigt wird. An beiden Messsystemen kann der Dreheffekt

der Probe im Probenhalter um die Rohrlängsachse nachgewiesen werden. Die Absorptionsgrade unterscheiden sich allerdings in ihrer Höhe, nicht aber beim generellen Verlauf über der Frequenz voneinander. Um an dieser Stelle Klarheit zu schaffen, ist folgende Lösung denkbar: Eine neu zu entwickelnde Normprobe wird in das jeweilige Messsystem eingesetzt und das Messsystem damit kalibriert. Als Kalibrationskurve dienen dabei Berechnungsergebnisse aus Materialmodellen, die, wie in dieser Dissertation gezeigt, mit den berechneten Absorptionsgraden aus Messungen gut übereinstimmen. Für die Fertigung der Normprobe wird der Zuschnitt mit Wasserstrahl ohne Abrasivmittel empfohlen, weil hier auch bei großen Probendicken die maximale Schallabsorption im Absorptionsgradspektrum bei einem Abstand von $\lambda/4$ der Probenoberseite zur reflektierenden Fläche am Stempel erreicht wird. Bis zur Realisierung einer Normprobe sollten Reihenuntersuchungen bestenfalls im gleichen Messsystem, das heißt einem Messsystem gleicher Bauart vom gleichen Hersteller, gemacht werden. Eine andere Möglichkeit besteht darin, dass die beteiligten Partner die individuell gefertigten Proben an eine zentrale Stelle schicken, in der die Messungen und Berechnungen zur Bestimmung der Absorptionsgrade durchgeführt werden.

A Anhang zur Beschreibung des Messsystems

$$\blacksquare p_{M1}(k) = e^{jkz_1} * p_v + e^{-jkz_1} * p_z$$

$$p_{M2}(k) = e^{jkz_0} * p_v + e^{-jkz_0} * p_z = e^{jk(z_1+\Delta z)} * p_v + e^{-jk(z_1+\Delta z)} * p_z$$

$$\blacksquare p_v(k) = e^{-jkz_1} * \frac{p_{M2} - e^{-jk\Delta z} * p_{M1}}{e^{jk\Delta z} - e^{-jk\Delta z}}$$

$$\blacksquare p_z(k) = e^{jkz_1} * \frac{e^{jk\Delta z} * p_{M1} - p_{M2}}{e^{jk\Delta z} - e^{-jk\Delta z}}$$

$$\blacksquare r(k) = \frac{p_z(k)}{p_v(k)} = e^{j2kz_1} * \frac{e^{jk\Delta z} * p_{M1} - p_{M2}}{p_{M2} - e^{-jk\Delta z} * p_{M1}}$$

$$\blacksquare r(k) = e^{j2kz_1} * \frac{e^{jk\Delta z} - H_{12}}{H_{12} - e^{-jk\Delta z}}$$

$$Z_1 = Z_0 \frac{1+r}{1-r} \quad \text{und} \quad r = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0}$$

$$\alpha = 1 - |r|^2$$

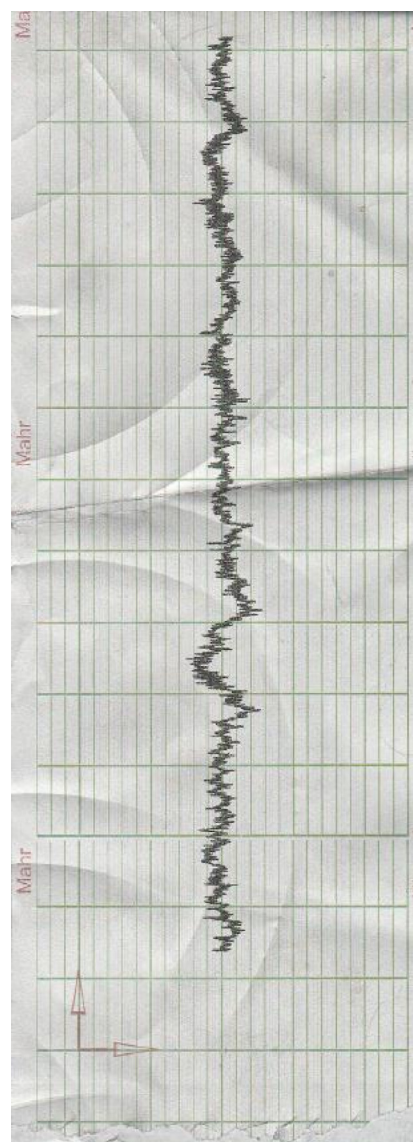
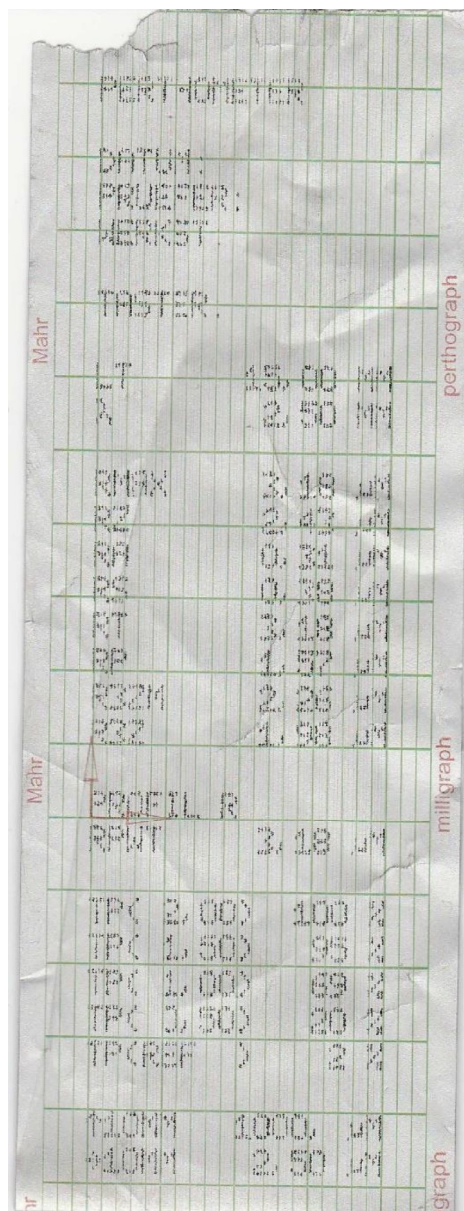


Abbildung A-1: Ergebnis der Messung von der Oberflächenrauigkeit auf der inneren Rohrwand des Probenhalters

B Anhang zur experimentellen Versuchsauswertung

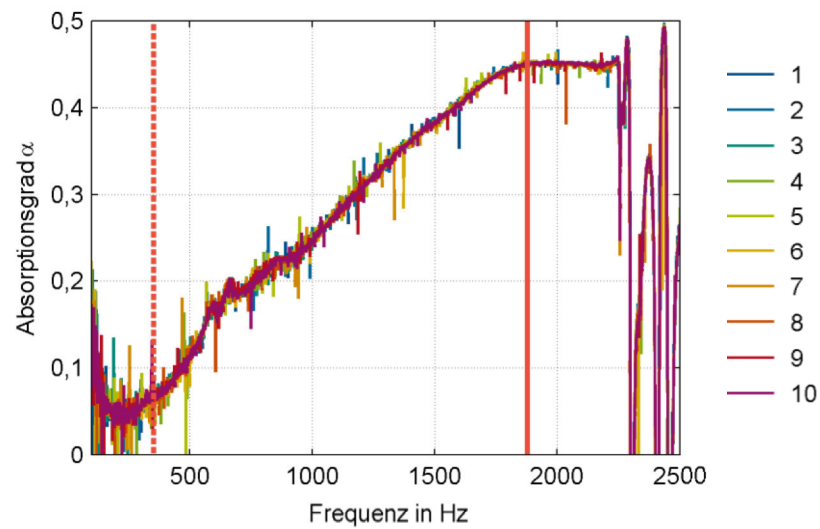


Abbildung B-1: Änderung des berechneten Schallabsorptionsgrades über der Frequenz durch den wiederholten (zehnmaligen) Einbau der Probe

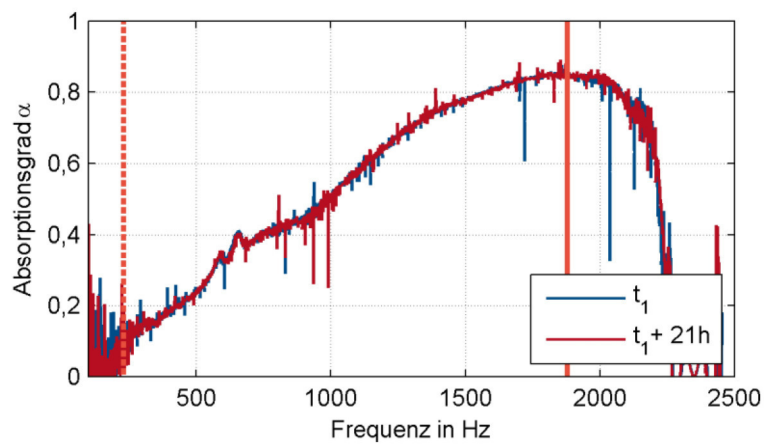


Abbildung B-2: Einfluss einer Ruhezeit von 21 h auf den berechneten Absorptionsgrad, während derer die Probe im Probenhalter montiert blieb (rote Kurve), Darstellung des Absorptionsgrades über der Frequenz zum Zeitpunkt t_1 in blau

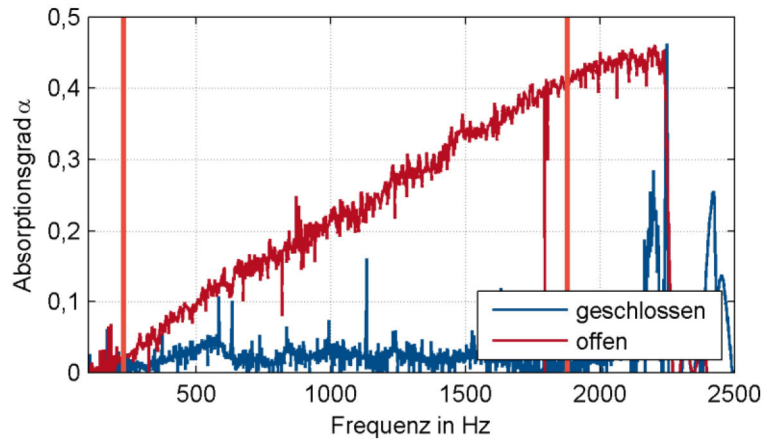


Abbildung B-3: Auswirkung von der Veränderung des Rohrabschlusses (geschlossen/offen) auf das Spektrum der Schallabsorption

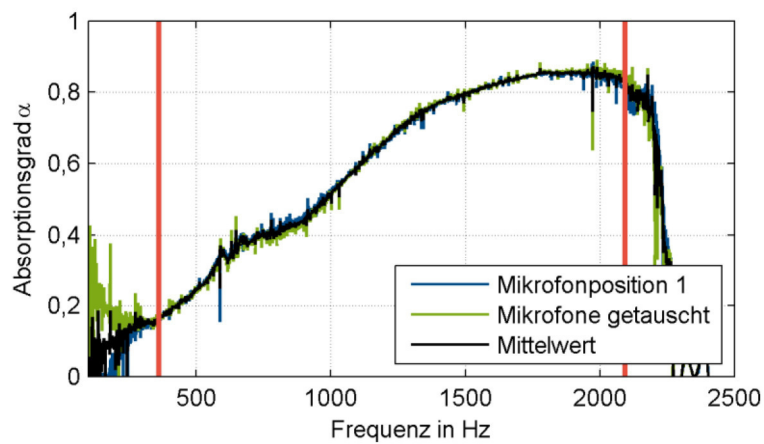


Abbildung B-4: Auswirkungen des Mikrofontausches auf den berechneten Absorptionsgrad über der Frequenz

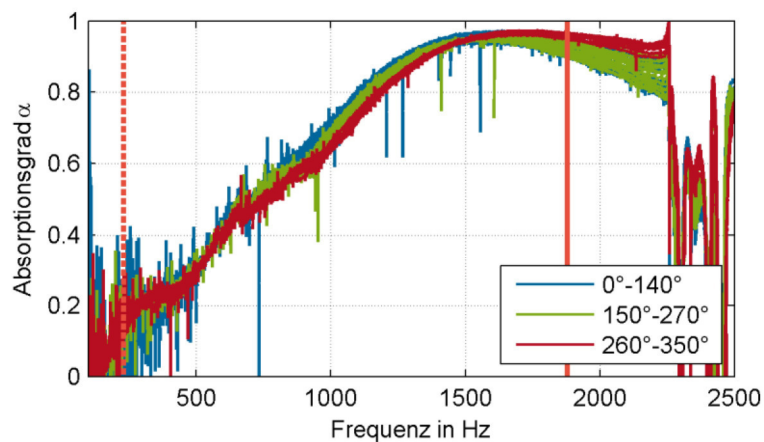


Abbildung B-5: Einfluss der Drehung einer Probe ohne sichtbaren Anschnitt im Probenhalter in 10°-Schritten um die Rohrlängsachse auf den Absorptionsgrad, Gruppierung der berechneten Absorptionsgrade zur besseren Visualisierung

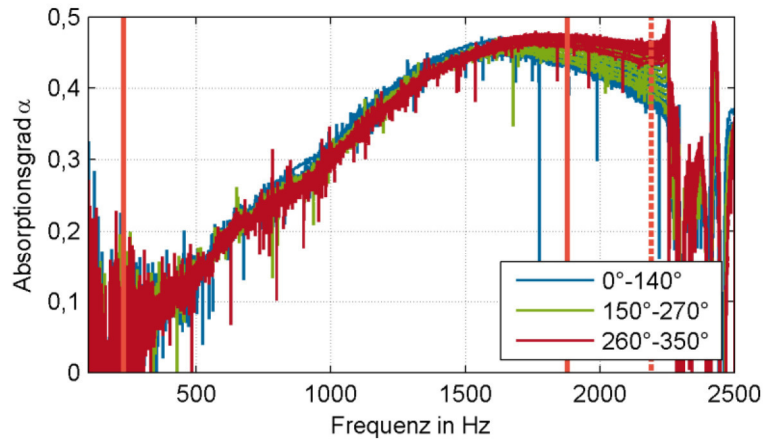


Abbildung B-6: Einfluss der Drehung einer Probe mit deutlich sichtbarer lokaler Verkleinerung des Durchmessers im Probenhalter in 10°-Schritten um die Rohrlängsachse auf den Absorptionsgrad, Gruppierung der berechneten Absorptionsgrade zur besseren Visualisierung

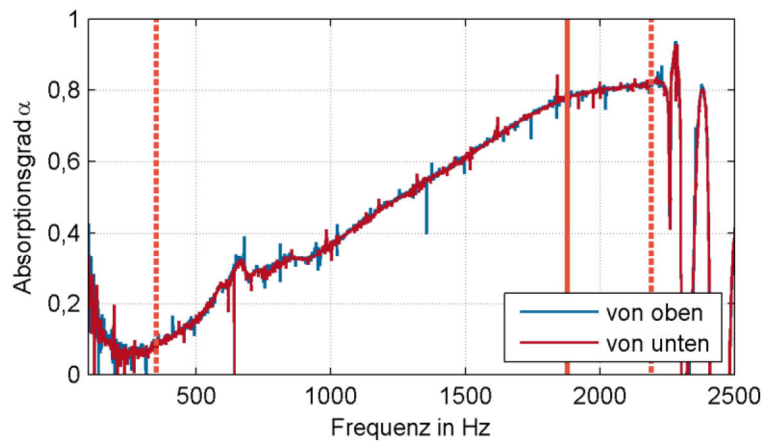


Abbildung B-7: Einfluss der Montagerichtung auf den berechneten Absorptionsgrad dargestellt anhand von Berechnungen aus Messungen an einer Probe der Dicke 20 mm

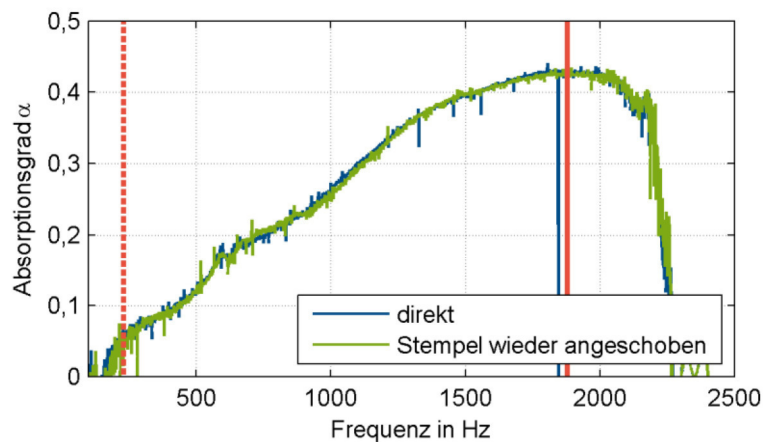


Abbildung B-8: Absorptionsgrad über Frequenz, berechnet aus Messungen, bei denen die Position des beweglichen Stempels direkt auf die Probendicke eingestellt wurde (blaue Kurve) und die Probe in den Probenhalter eingesetzt wurde oder nochmals von der Probe weggezogen und anschließend erneut an die Probe herangedrückt wurde (grüne Kurve)



Abbildung B-9: Rundmesser zur Einspannung in die Ständerbohrmaschine für den Probenzuschnitt

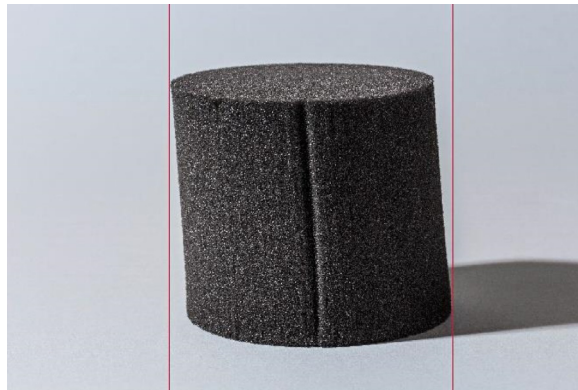
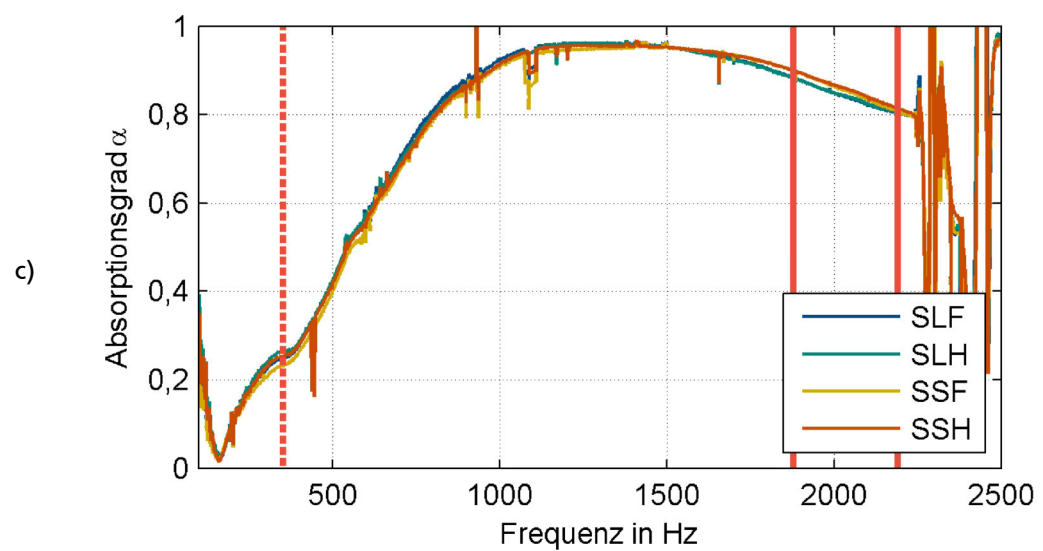
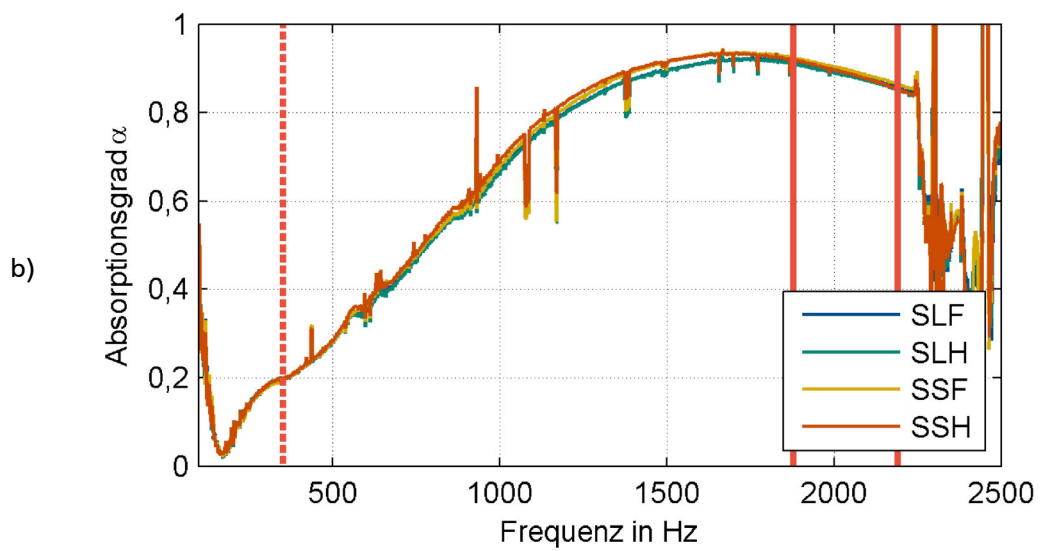
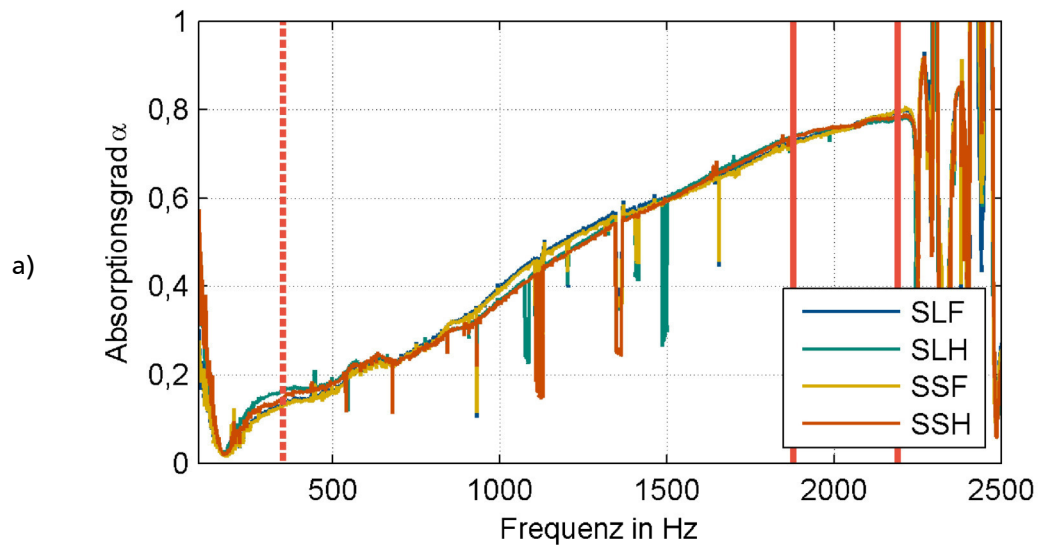


Abbildung B-10: Nichtrechtwinkligkeit und Anschnittskerbe einer Probe (Fertigung: Wasserstrahlzuschnitt mit Abrasivmittel) [Bild: Fraunhofer LBF]



Abbildung B-11: Probenhalterung zur Fertigung von Rundproben an der Bandsäge



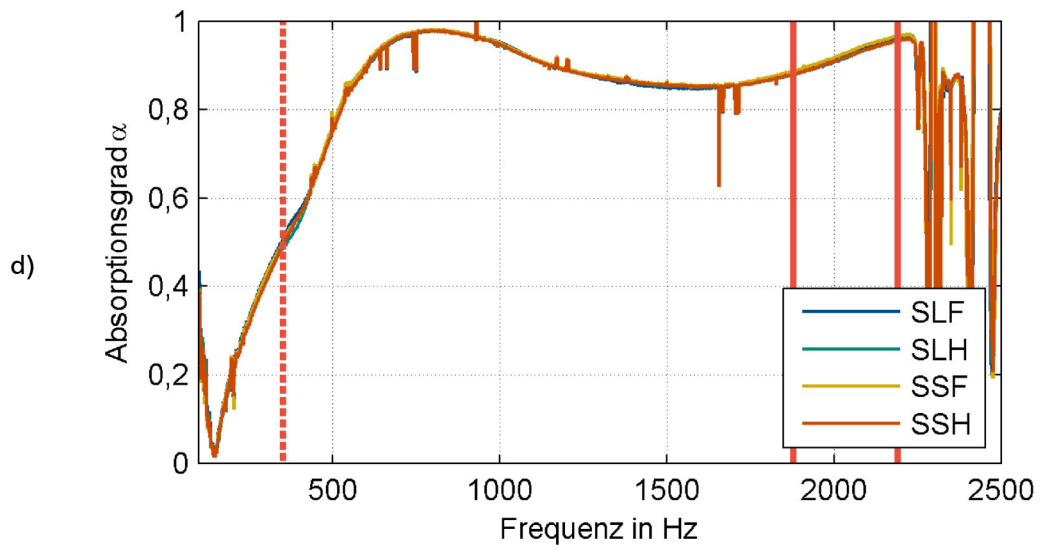


Abbildung B-12: Einfluss des Zuschnittsverfahrens (hier: Sägeverfahren) auf den Absorptionsgrad bei verschiedenen Probendicken: a) 30 mm; b) 40 mm; c) 50 mm; d) 80 mm

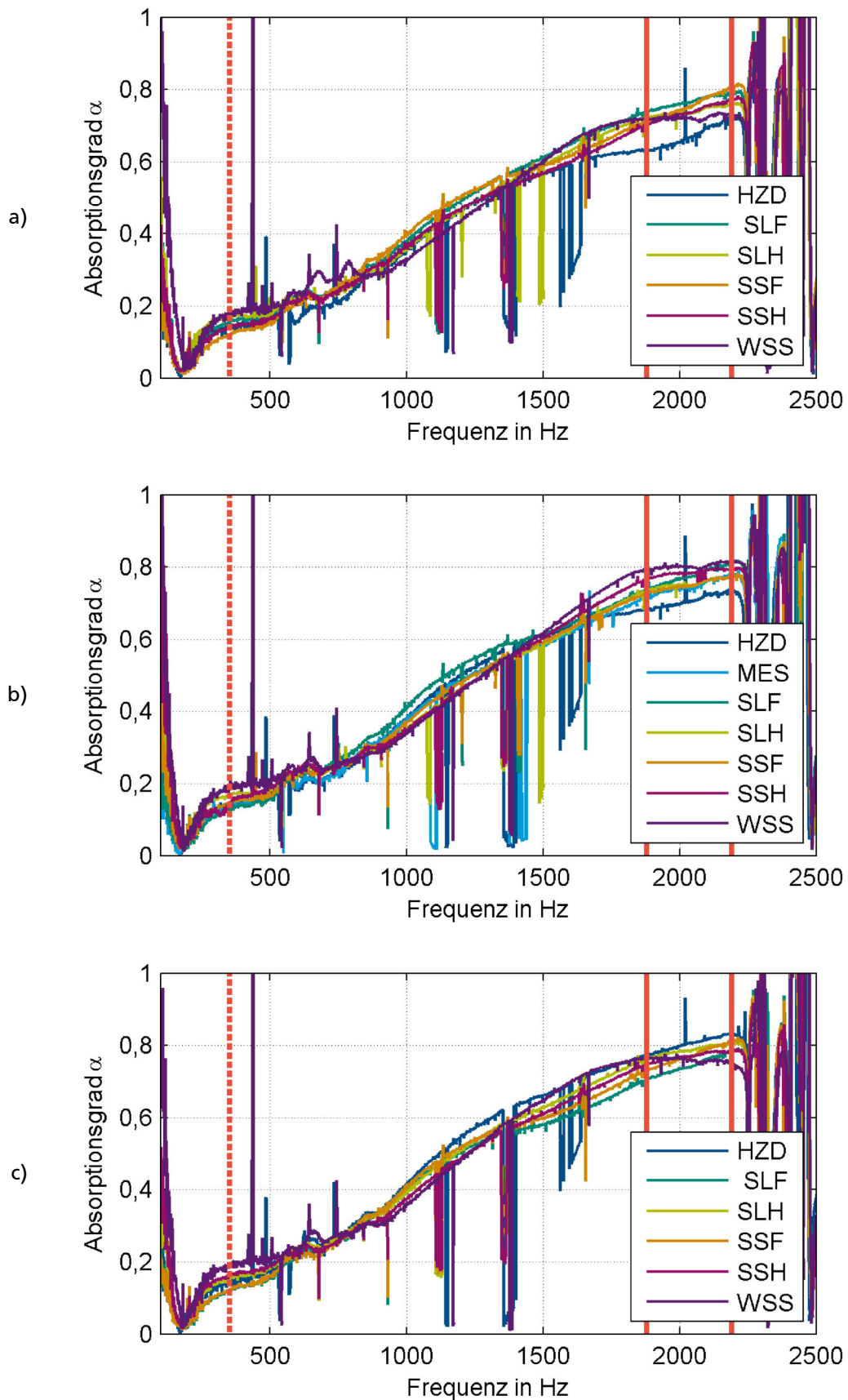


Abbildung B-13: Einfluss des Zuschnittsverfahrens auf den Absorptionsgrad bei der Probendicke 30 mm für verschiedene Durchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm

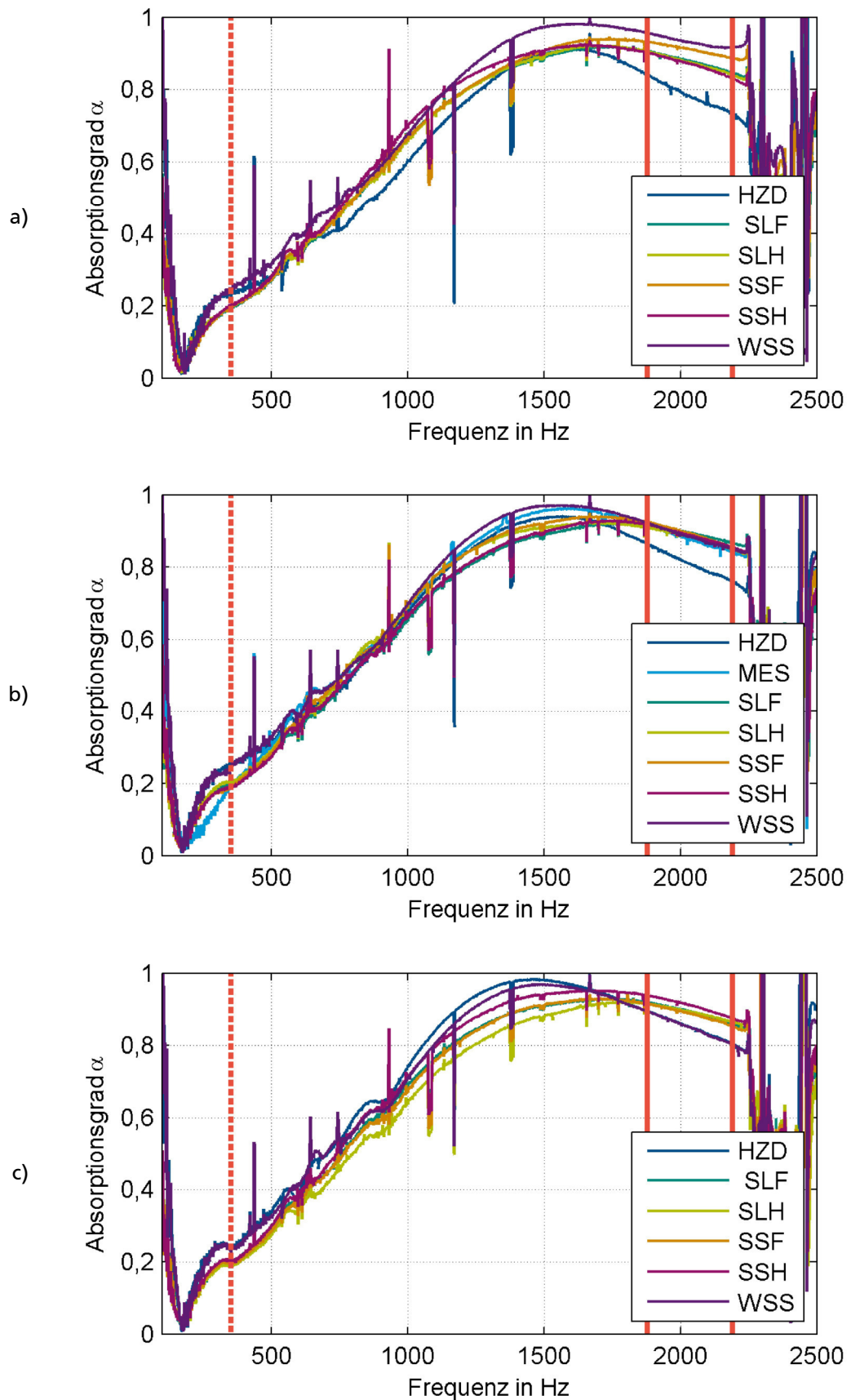


Abbildung B-14: Einfluss des Zuschnittsverfahrens auf den Absorptionsgrad bei der Probendicke 40 mm für verschiedene Durchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm

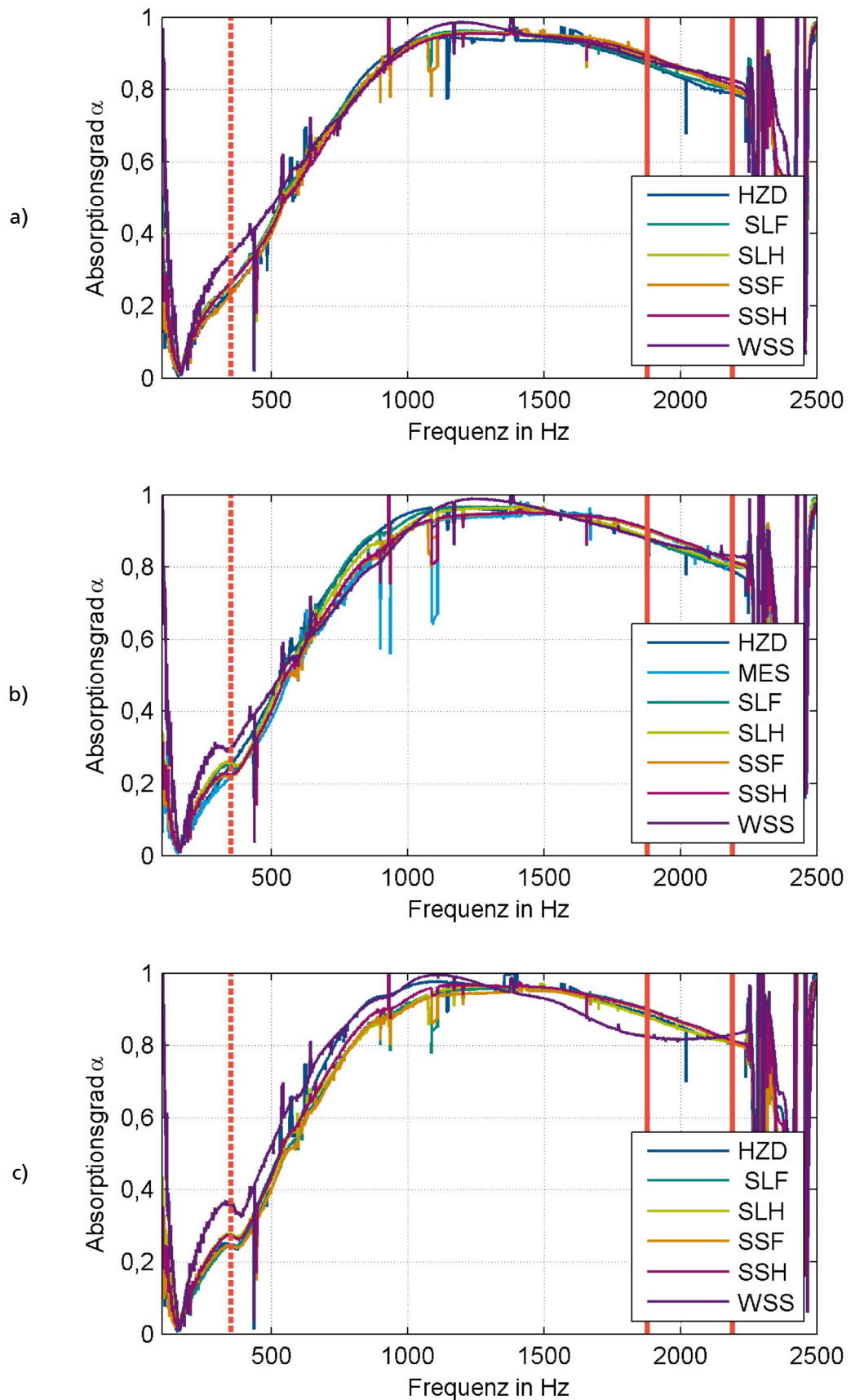


Abbildung B-15: Einfluss des Zuschnittsverfahrens auf den Absorptionsgrad bei der Probendicke 50 mm für verschiedene Durchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm

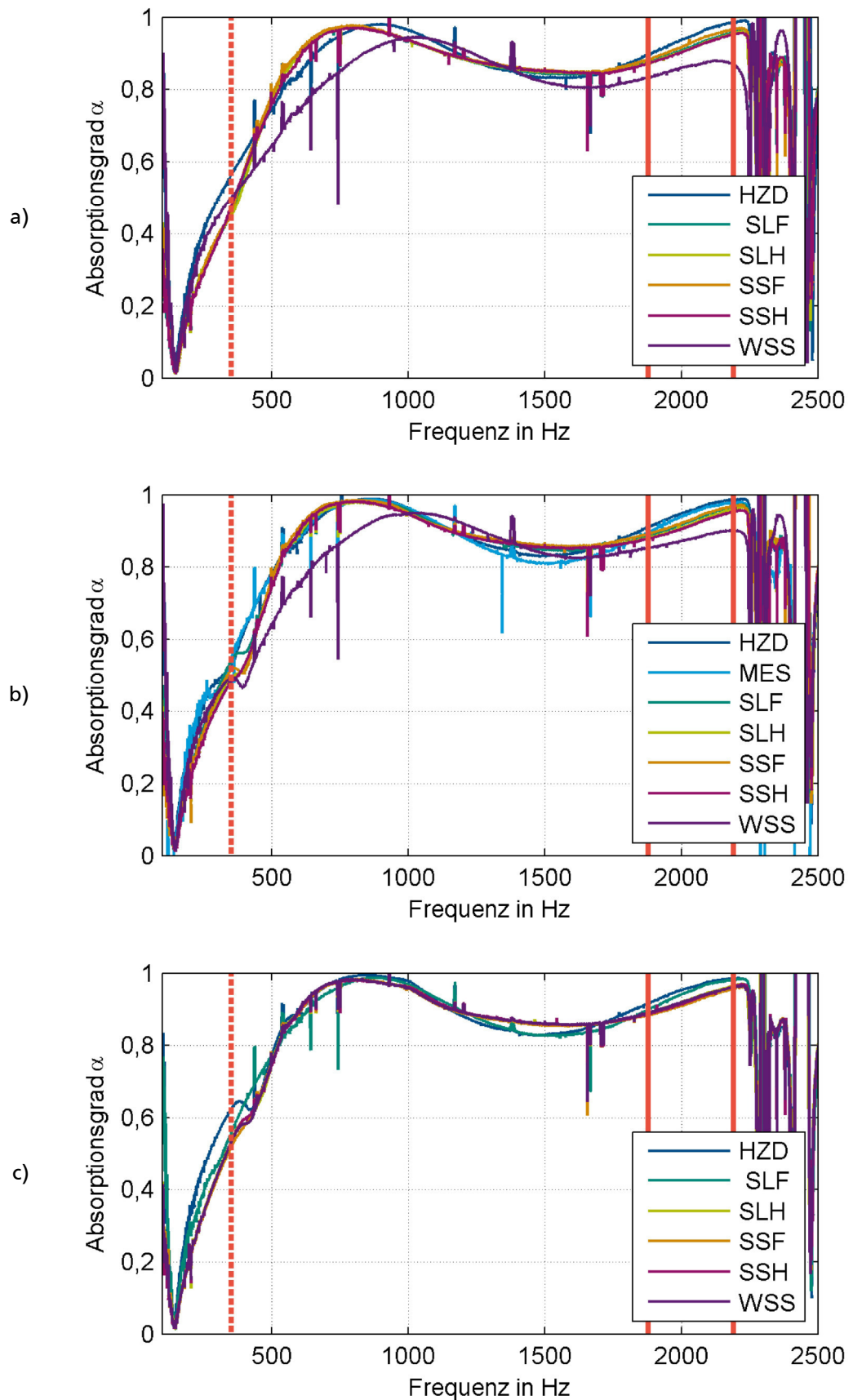


Abbildung B-16: Einfluss des Zuschnittsverfahrens auf den Absorptionsgrad bei der Probendicke 80 mm für verschiedene Durchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm

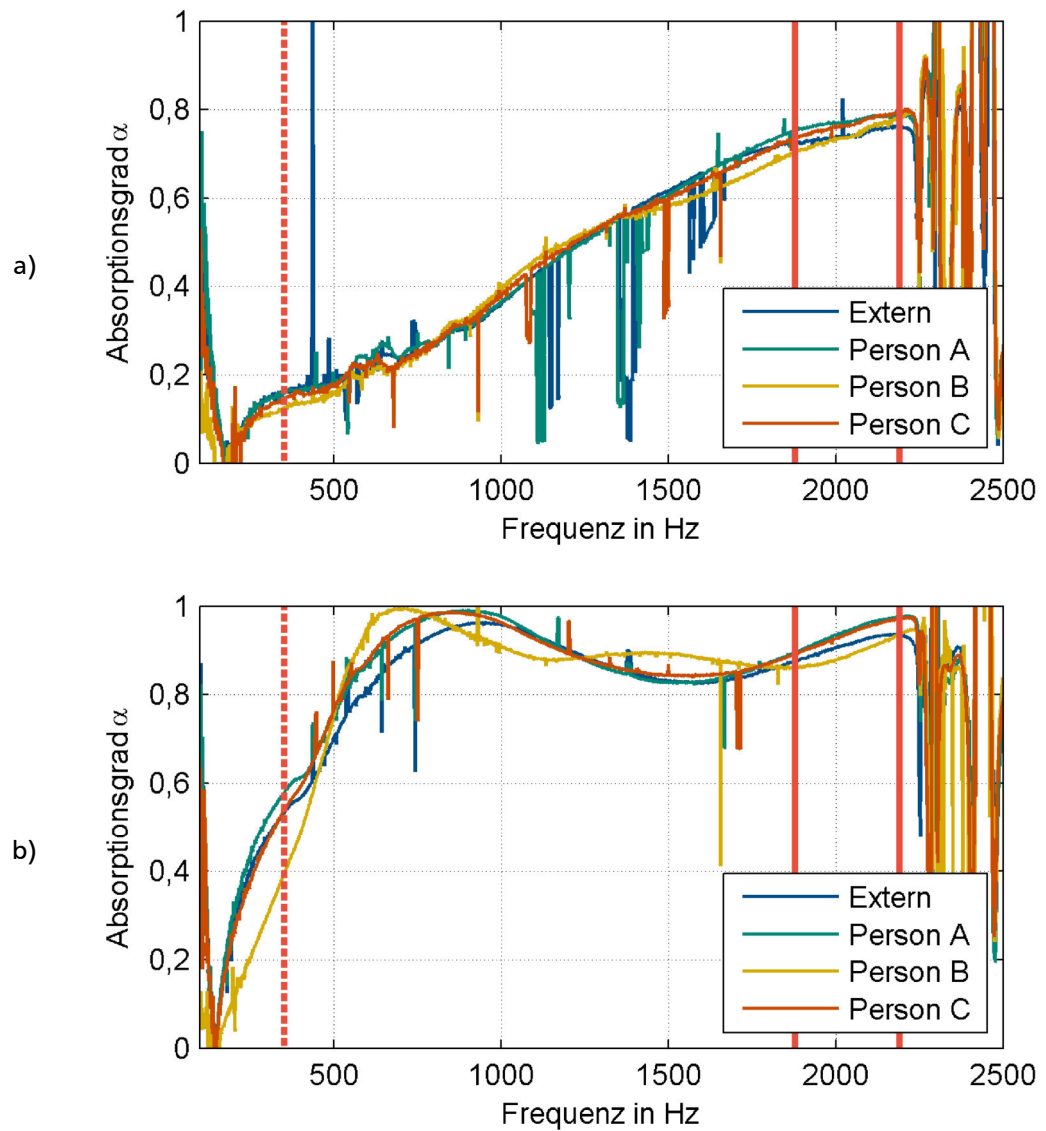


Abbildung B-17: Absorptionsgrad über der Frequenz in Abhängigkeit von der Person, die die Proben fertigt, für verschiedene Probendicke: a) 30 mm; b) 80 mm

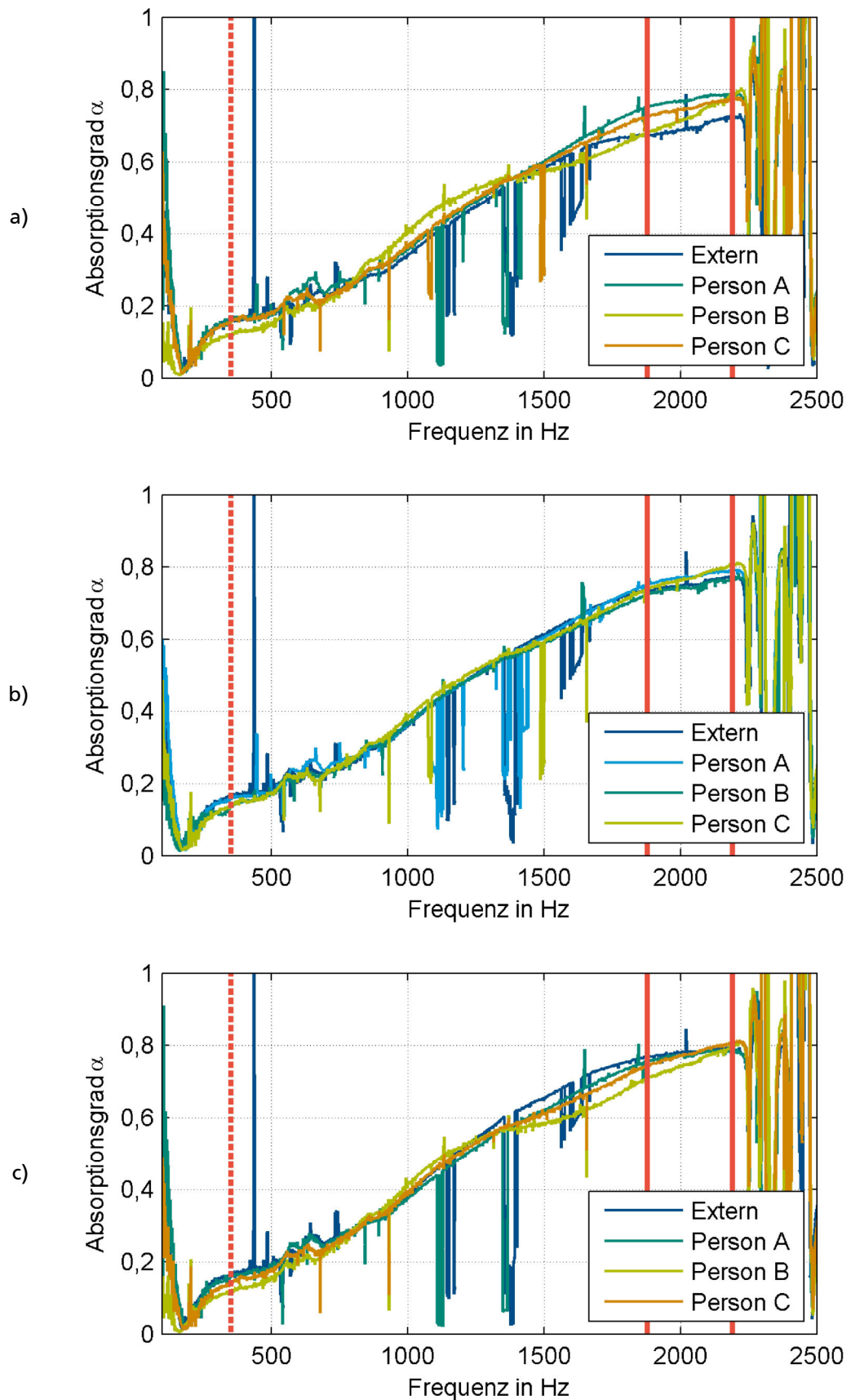


Abbildung B-18: gemittelter Absorptionsgrad über der Frequenz in Abhängigkeit von der Person des Zugschnitts für die Probendicke 30 mm und verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm

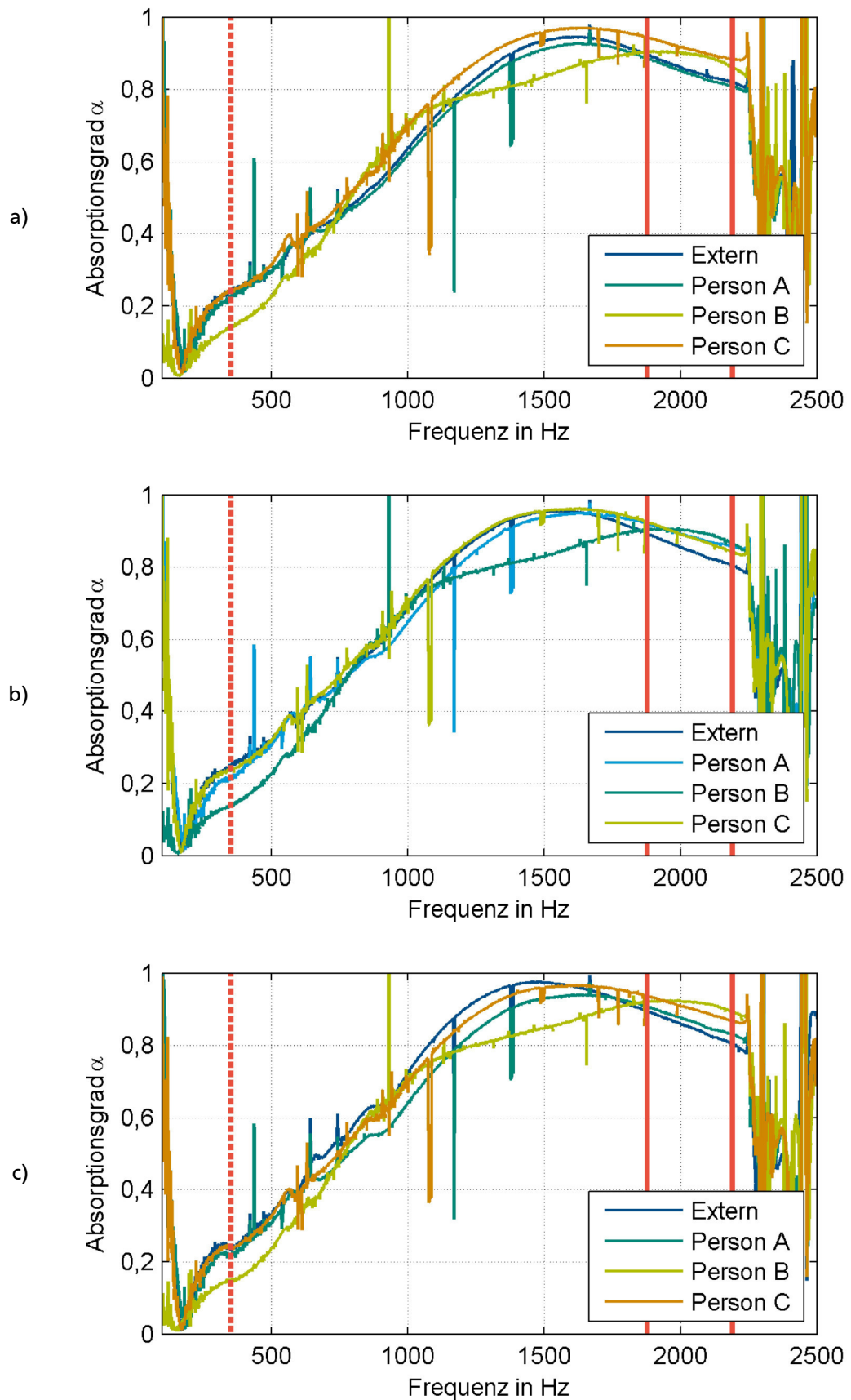


Abbildung B-19: gemittelter Absorptionsgrad über der Frequenz in Abhängigkeit von der Person des Zugschnitts für die Probendicke 40 mm und verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm

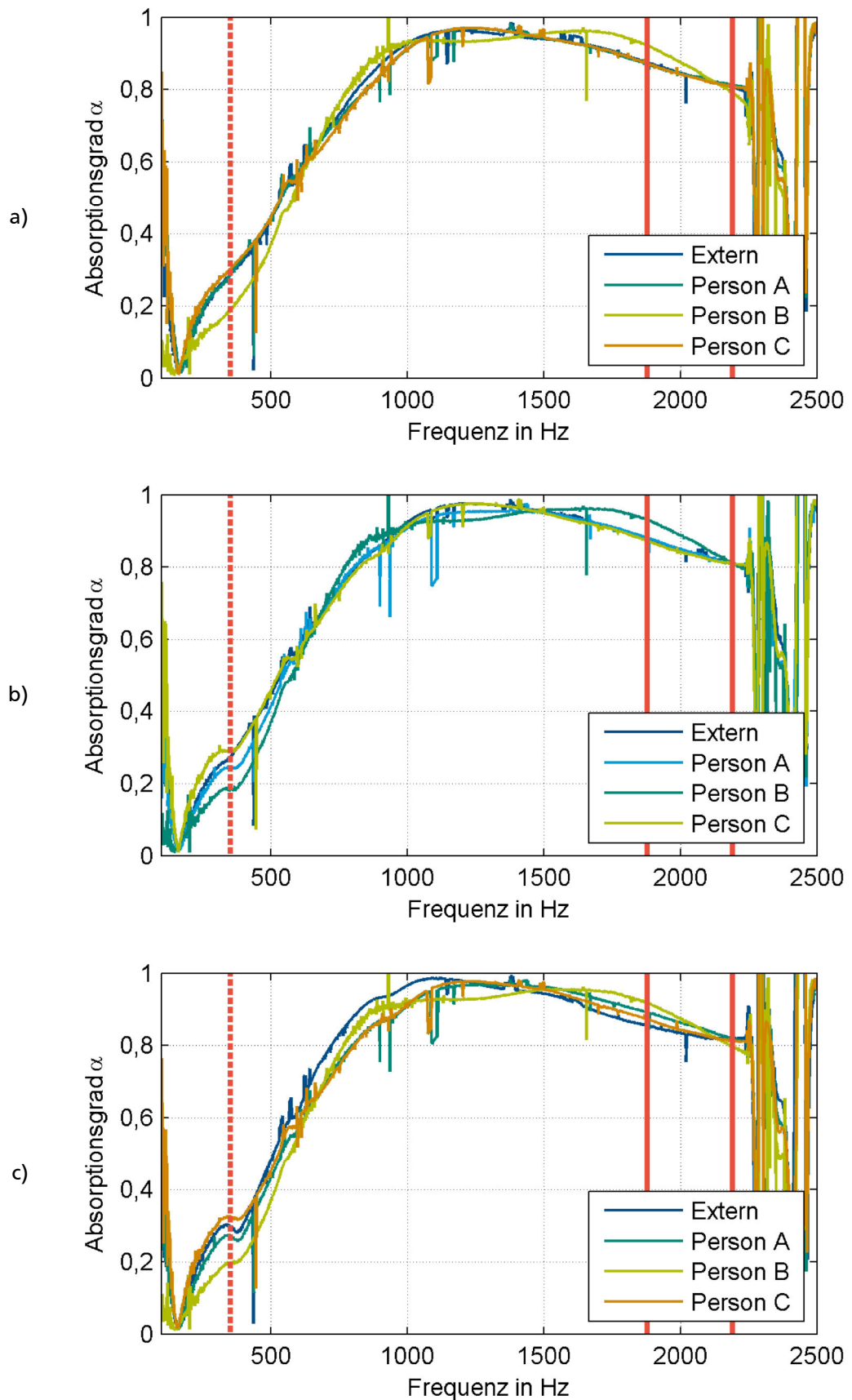


Abbildung B-20: gemittelter Absorptionsgrad über der Frequenz in Abhängigkeit von der Person des Zugschnitts für die Probendicke 50 mm und verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm

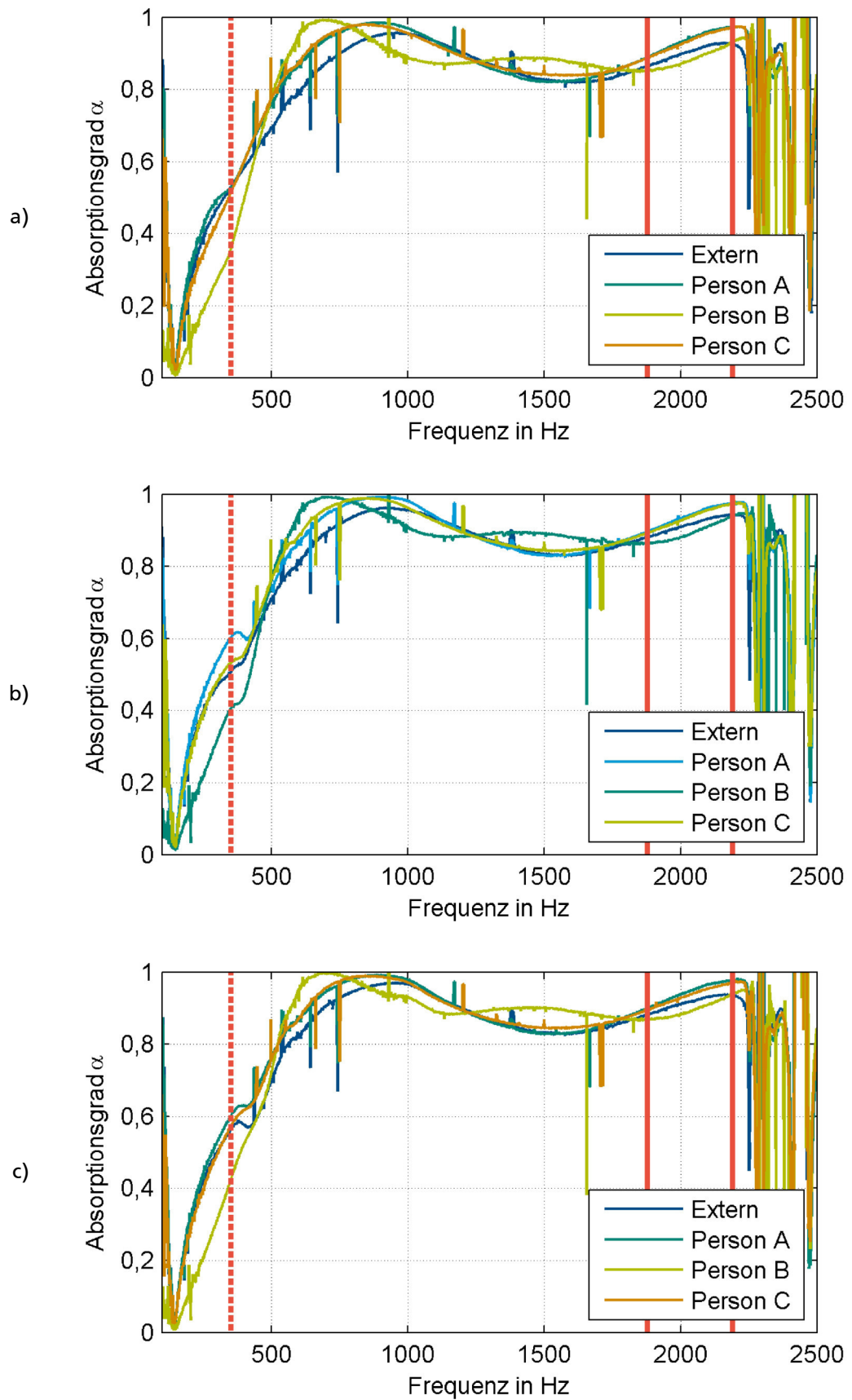
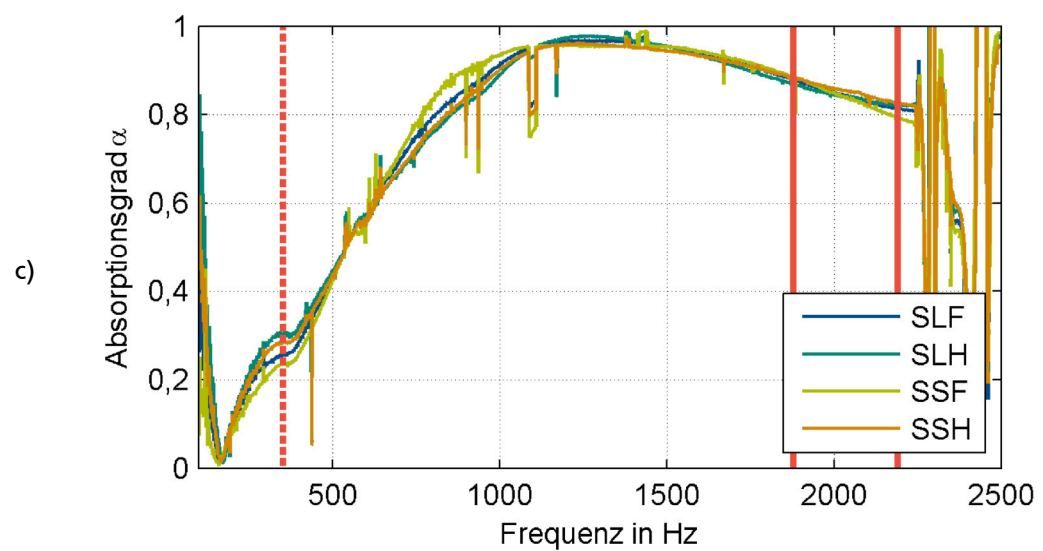
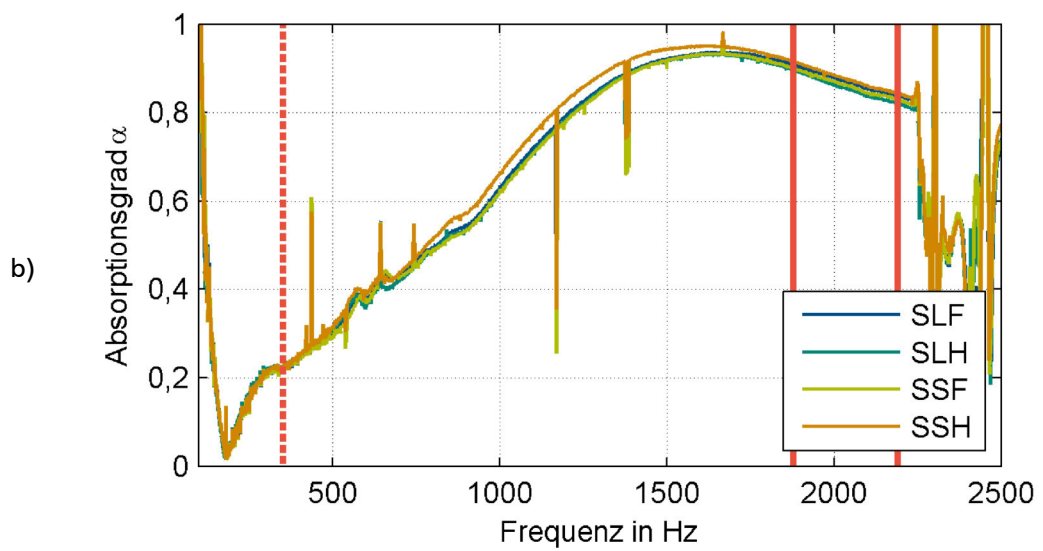
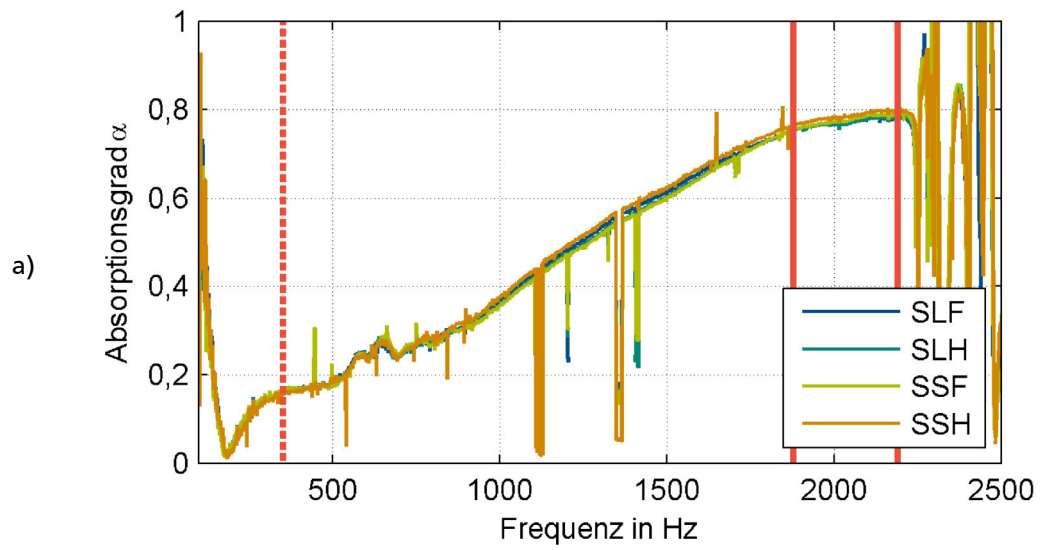


Abbildung B-21: gemittelter Absorptionsgrad über der Frequenz in Abhängigkeit von der Person des Zugschnitts für die Probendicke 50 mm und verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm



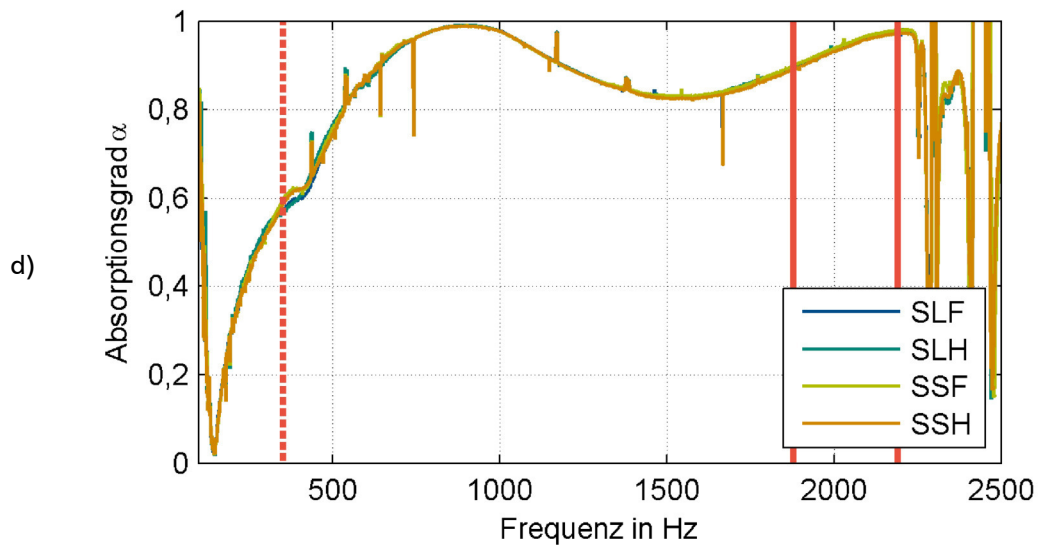
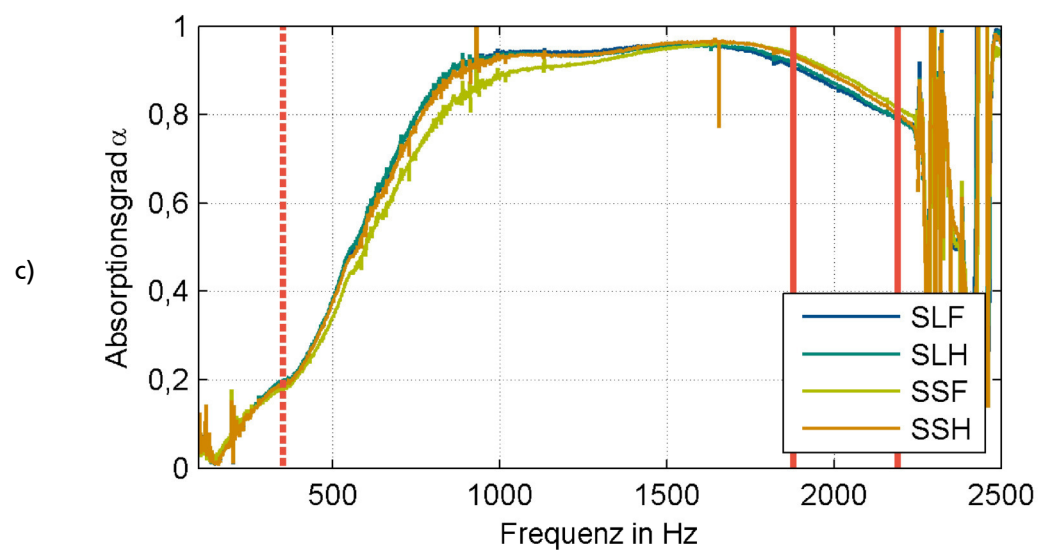
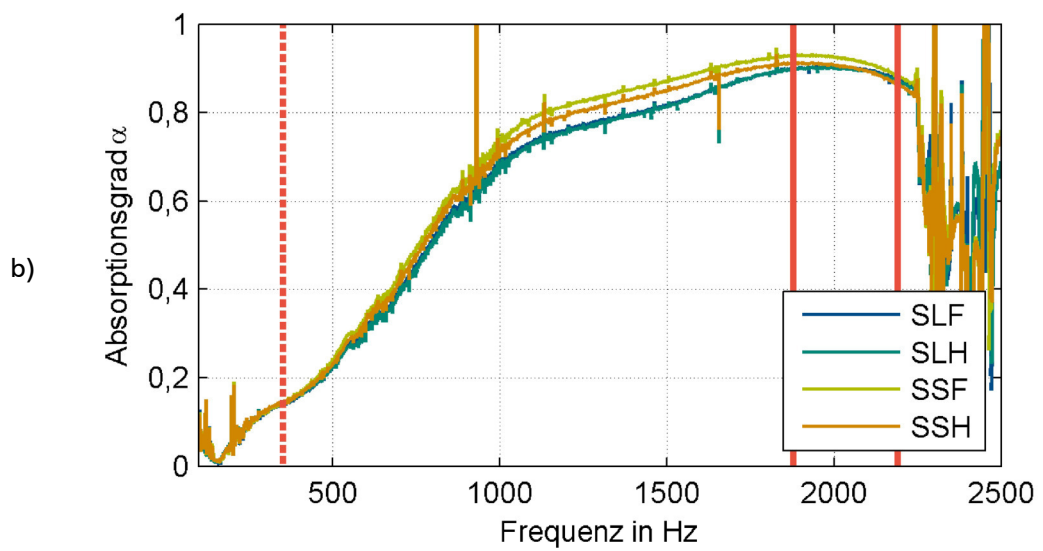
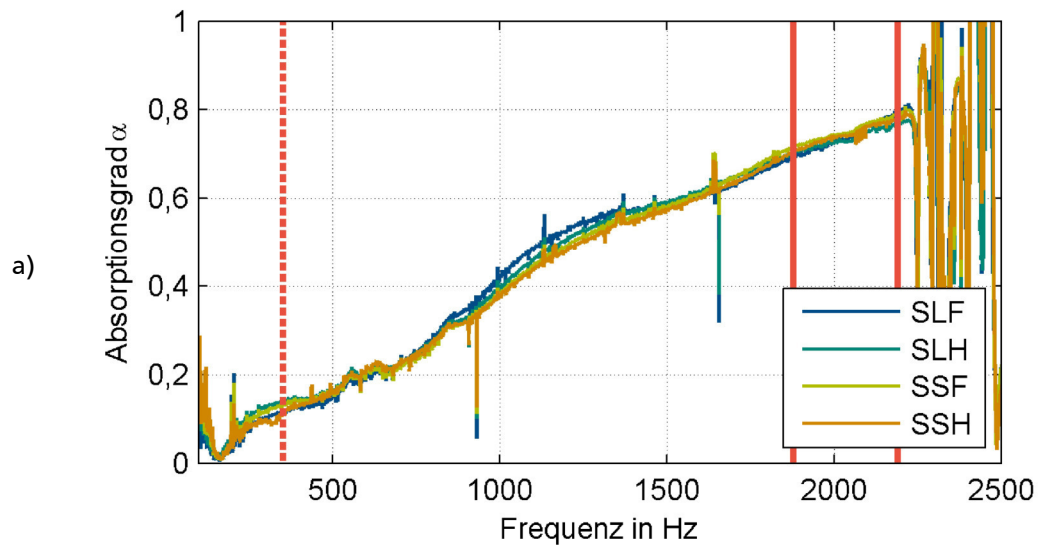


Abbildung B-22: Einfluss des Zuschnittsverfahrens beim Zuschnitt durch Person 1 auf das Spektrum des Absorptionsgrades bei den verschiedenen Probendicken: a) 30 mm; b) 40 mm; c) 50 mm; d) 80 mm



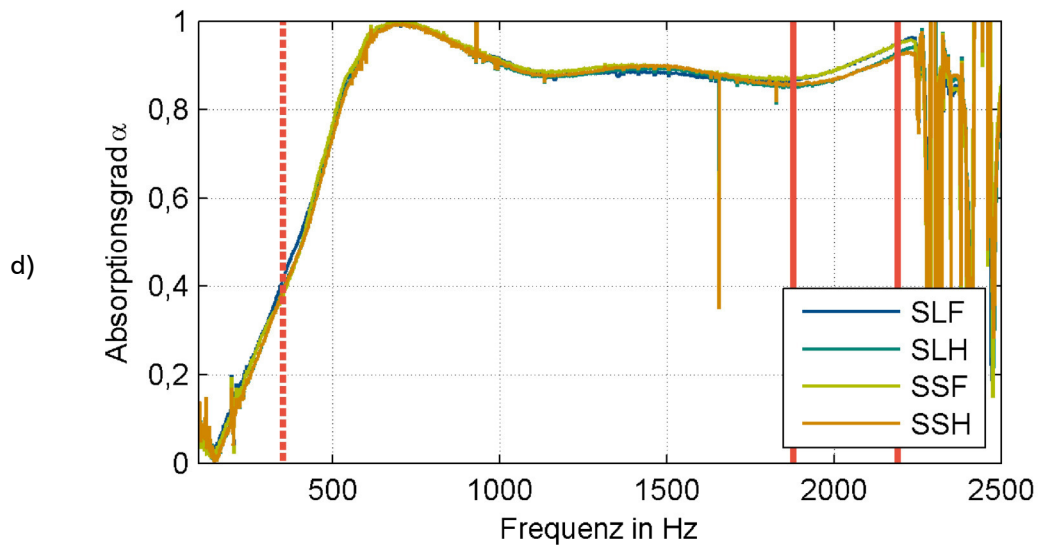
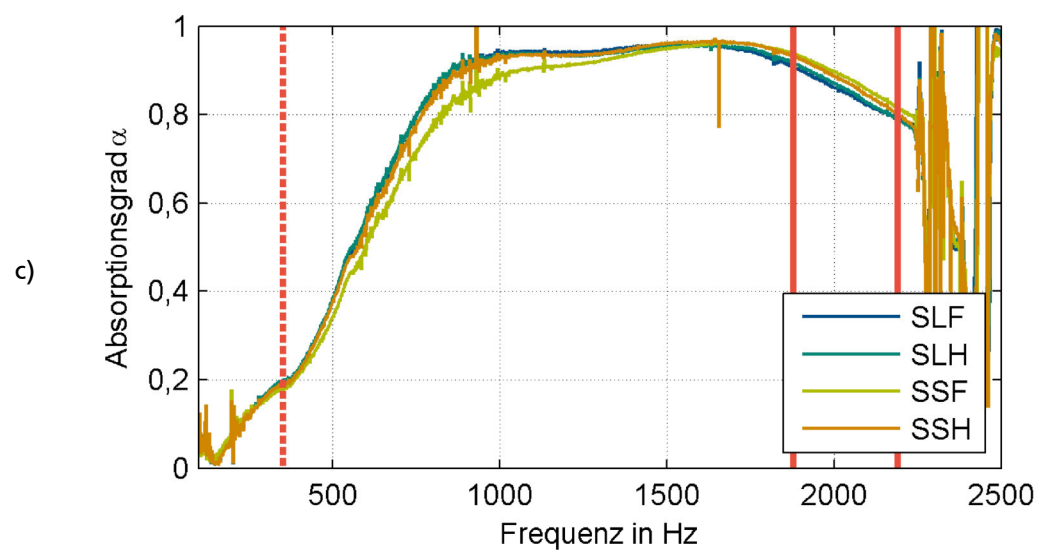
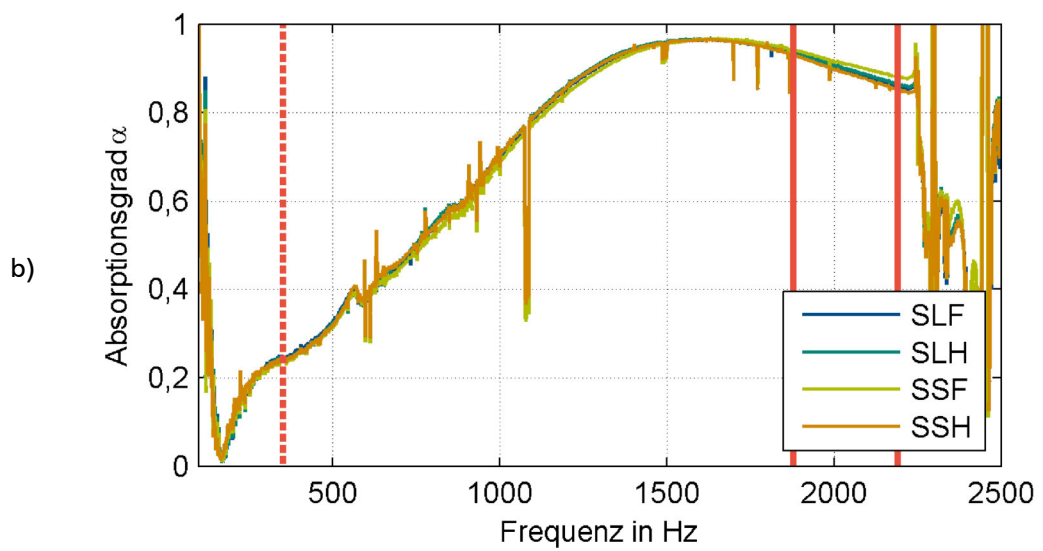
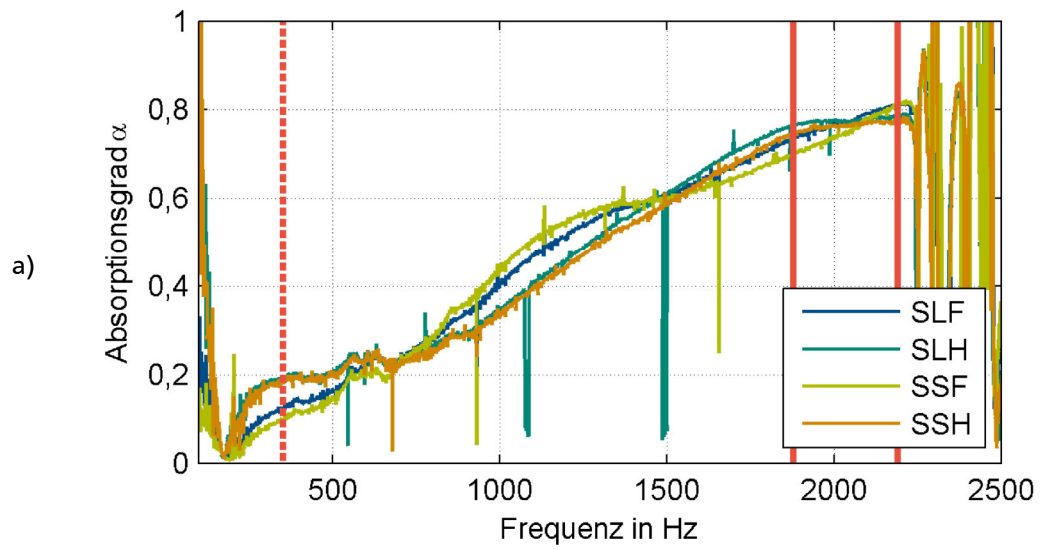


Abbildung B-23: Einfluss des Zuschnittsverfahrens beim Zuschnitt durch Person B auf das Spektrum des Absorptionsgrades bei den verschiedenen Probendicken : a) 30 mm; b) 40 mm; c) 50 mm; d) 80 mm



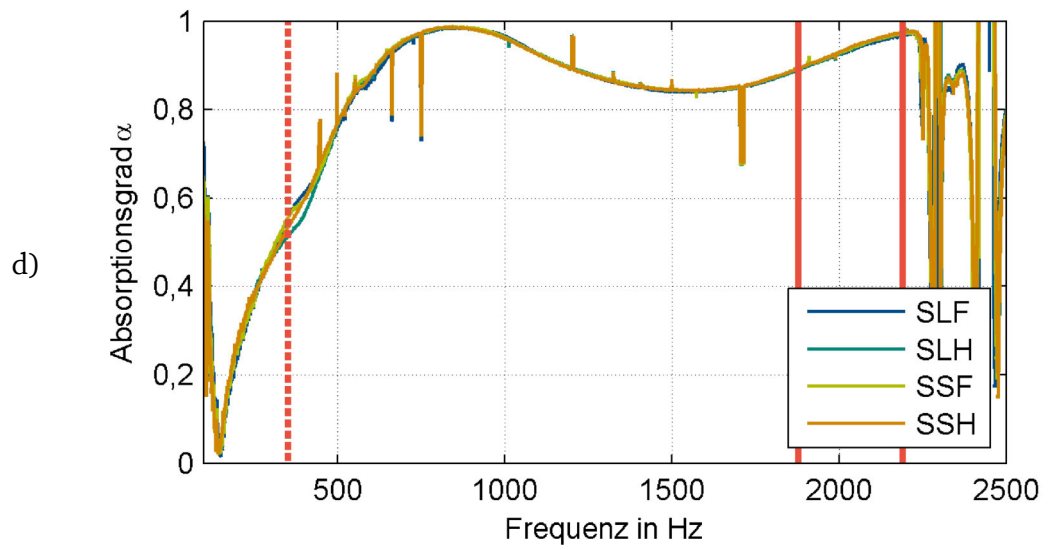


Abbildung B-24: Einfluss des Zuschnittsverfahrens beim Zuschnitt durch Person C auf das Spektrum des Absorptionsgrades bei den verschiedenen Probendicken: a) 30 mm; b) 40 mm; c) 50 mm; d) 80 mm

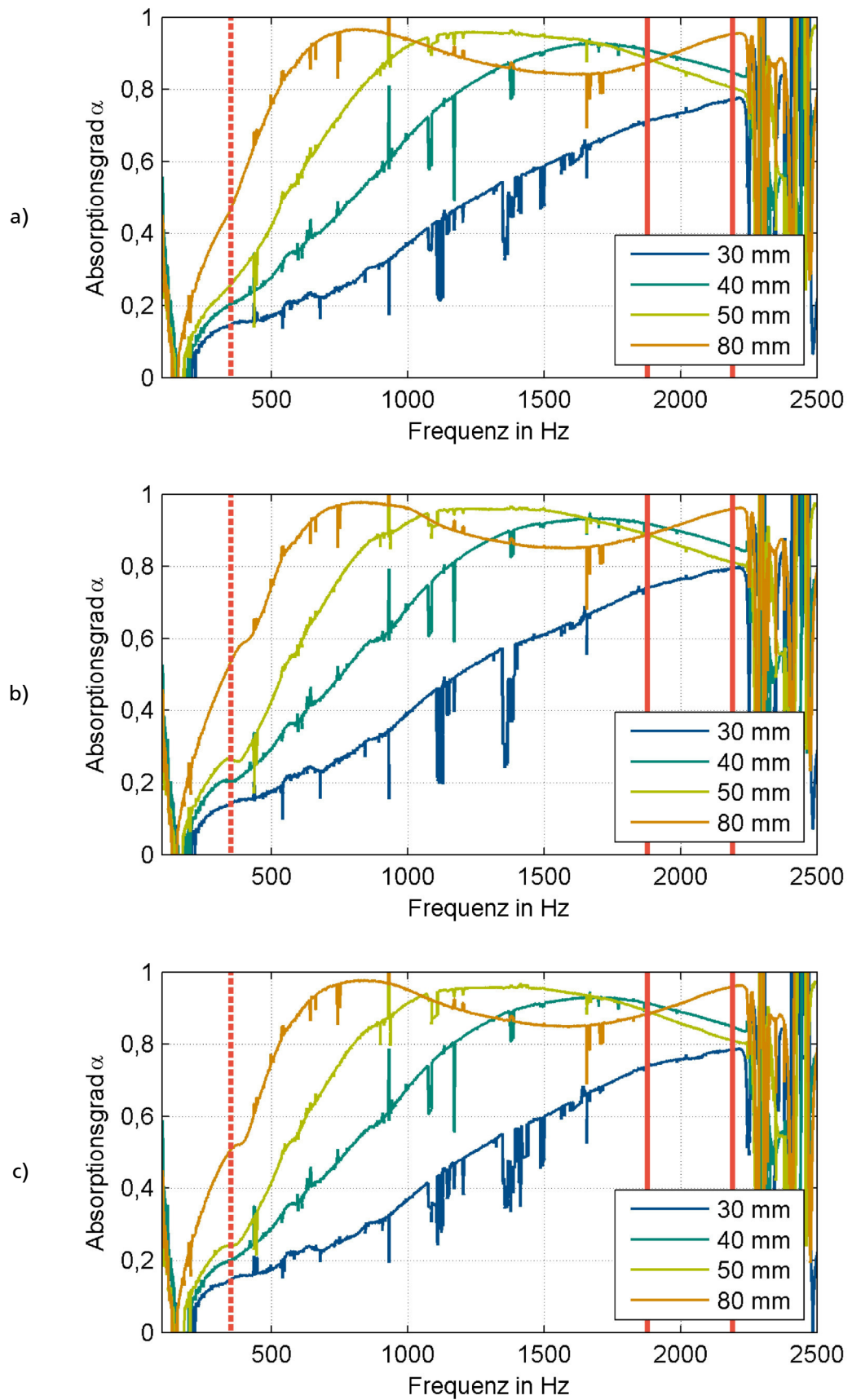
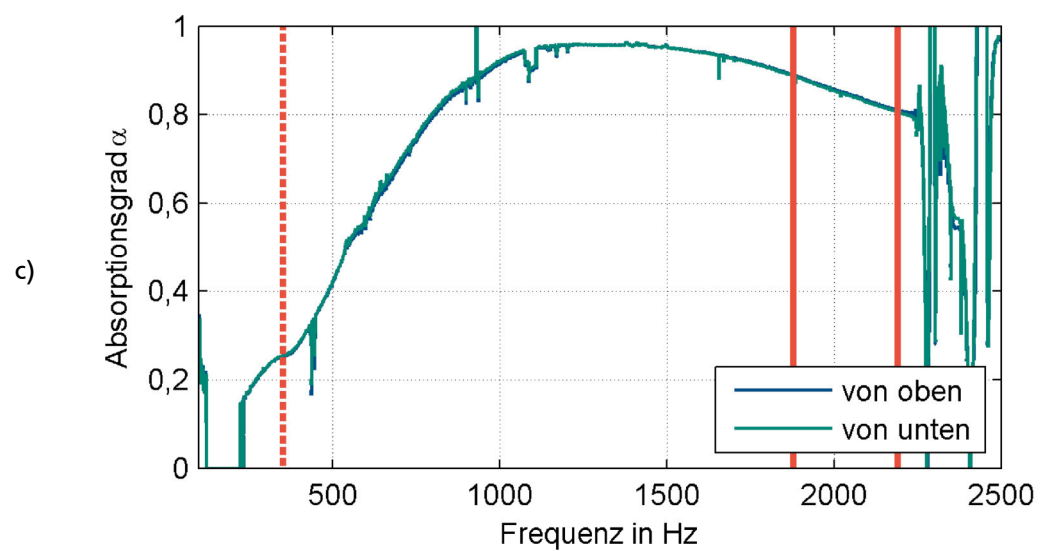
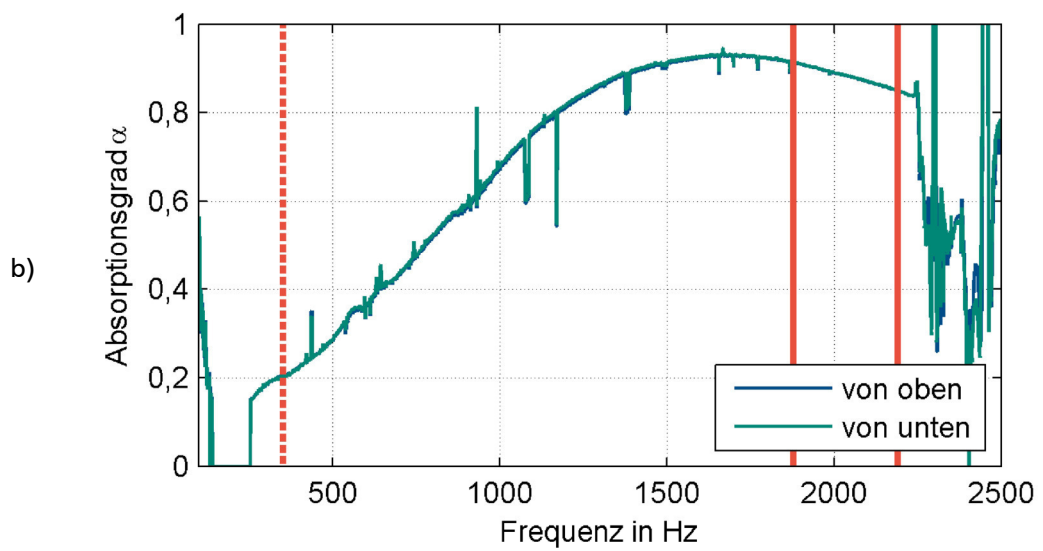
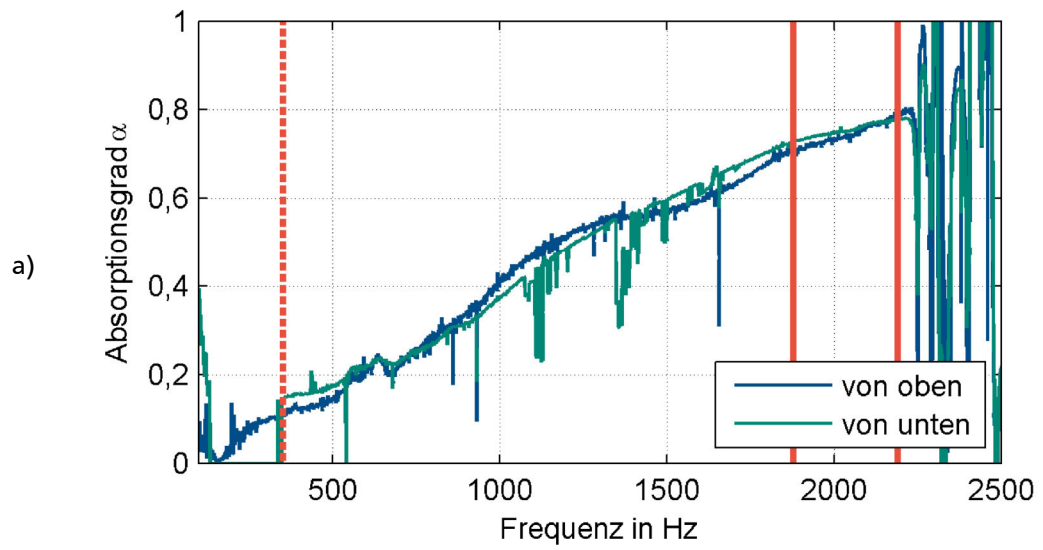


Abbildung B-25: Abhängigkeit des Absorptionsgrades von der Probendicke und dem Durchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm



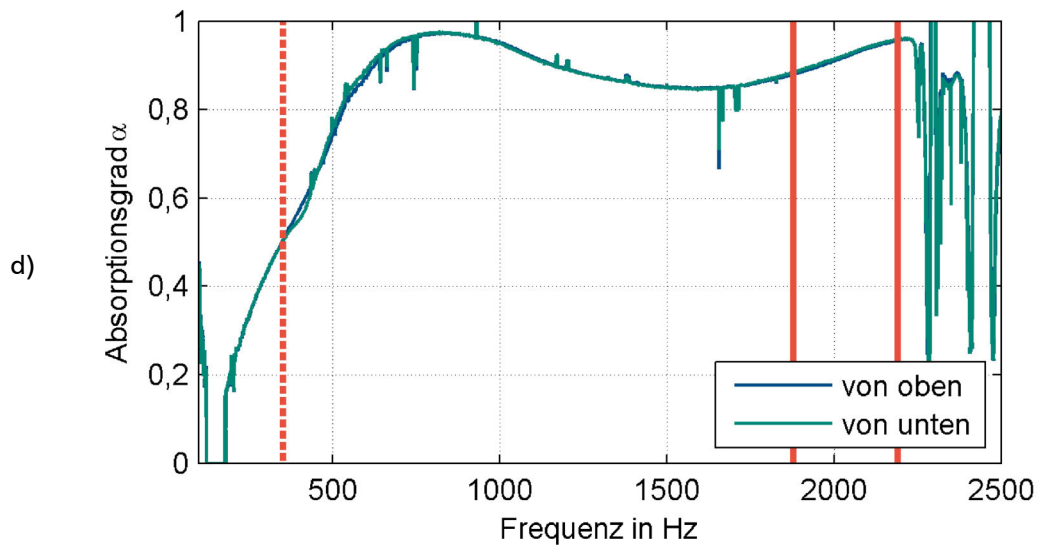


Abbildung B-26: Einfluss verschiedener Einbaumöglichkeiten auf den Absorptionsgrad dargestellt für 4 Probendicken: a) 30 mm; b) 40 mm; c) 50 mm; d) 80 mm

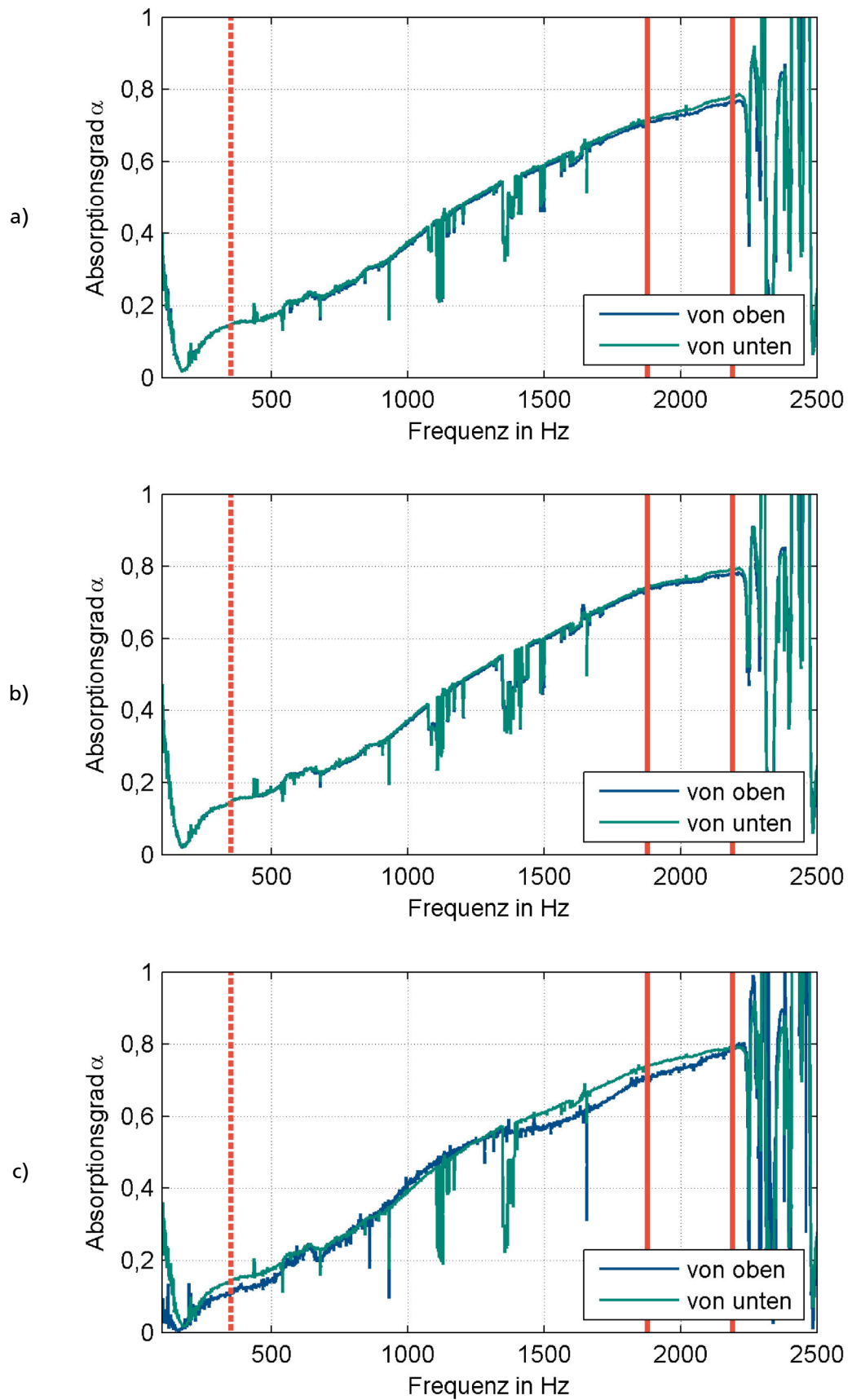


Abbildung B-27: Auswirkung verschiedener Einbaumöglichkeiten der Probe in den Probenhalter auf den Absorptionsgrad bei der Probendicke 30 mm für verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm

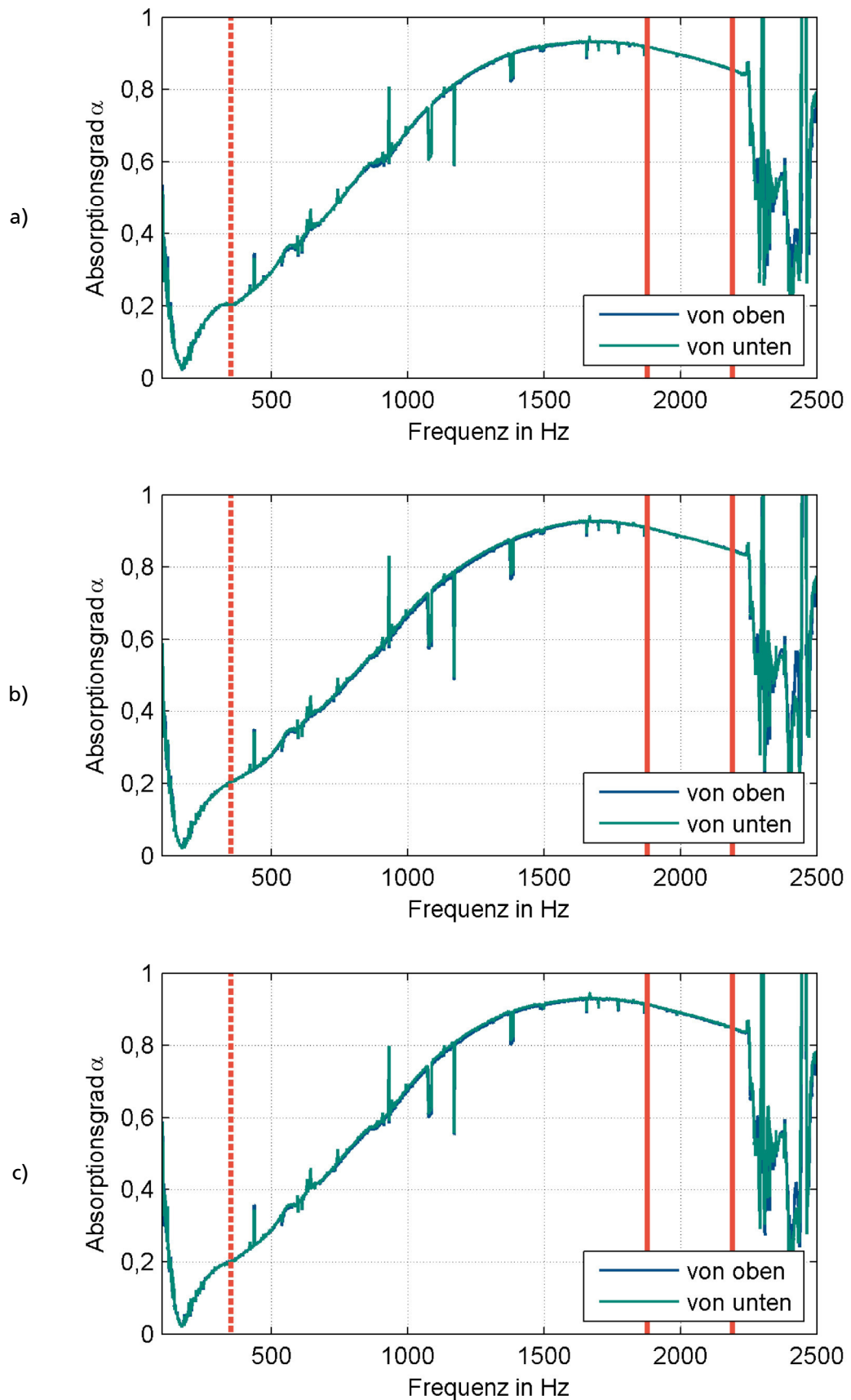


Abbildung B-28: Auswirkung verschiedener Einbaumöglichkeiten der Probe in den Probenhalter auf den Absorptionsgrad bei der Probendicke 40 mm für verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm

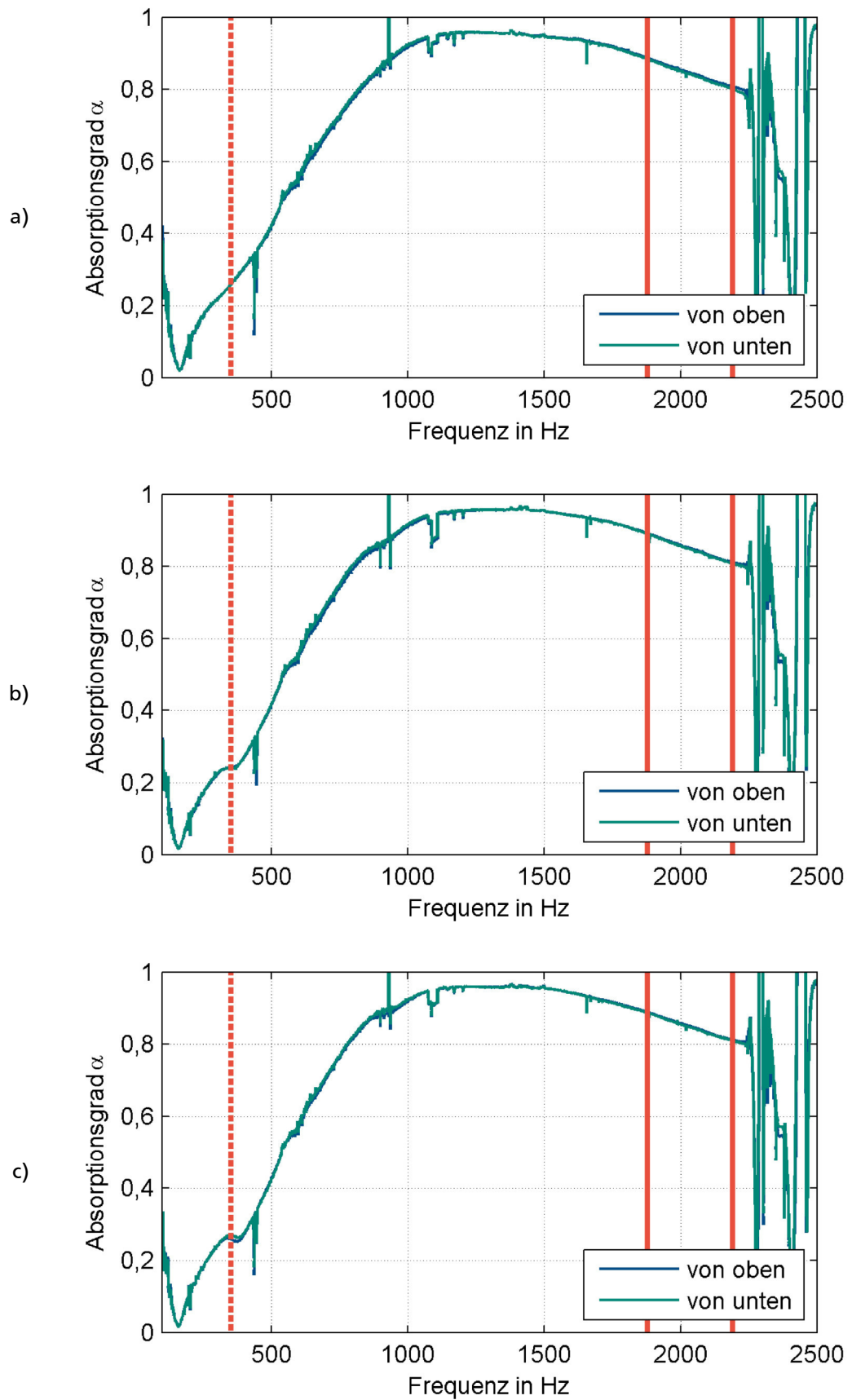


Abbildung B-29: Auswirkung verschiedener Einbaumöglichkeiten der Probe in den Probenhalter auf den Absorptionsgrad bei der Probendicke 50 mm für verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm

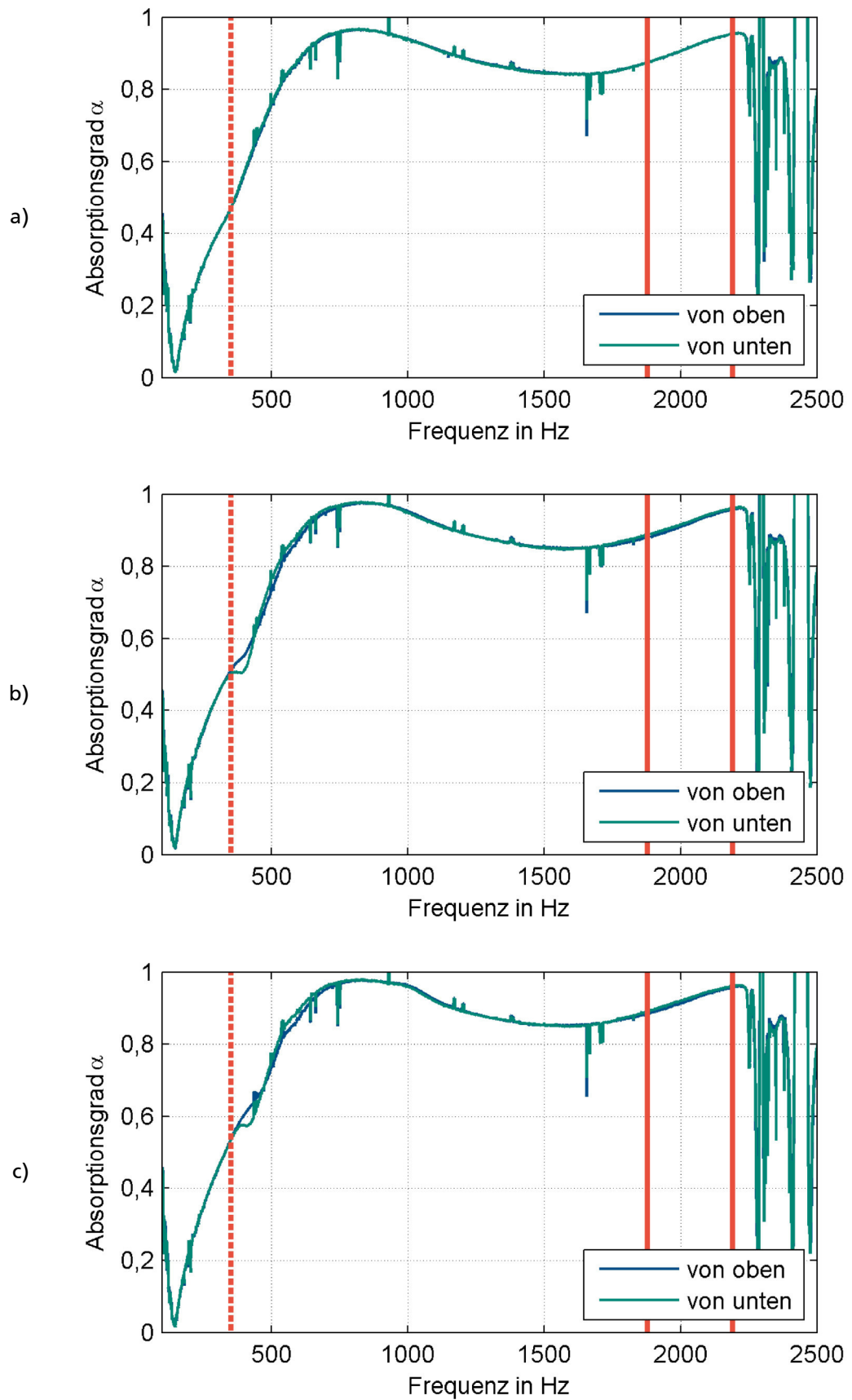
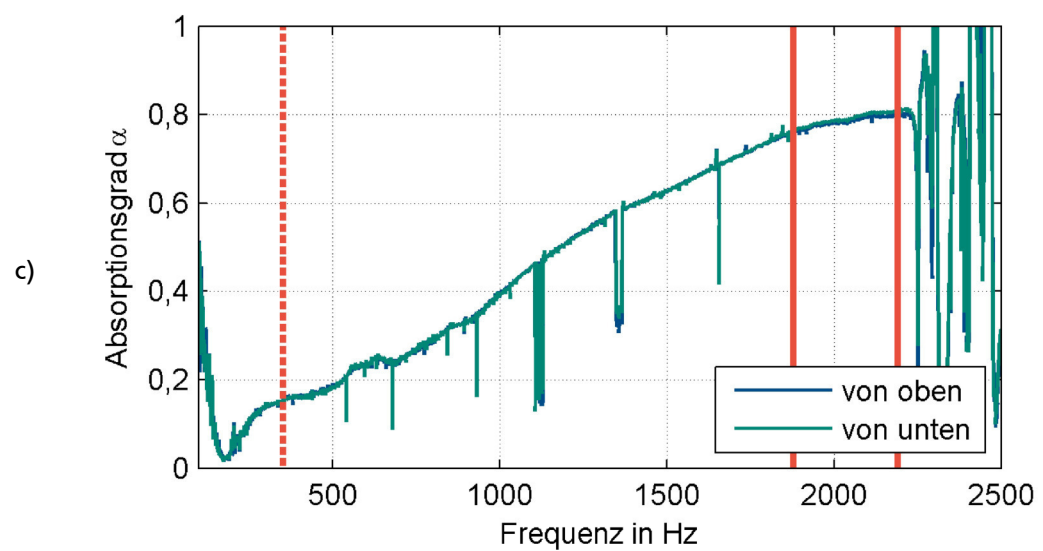
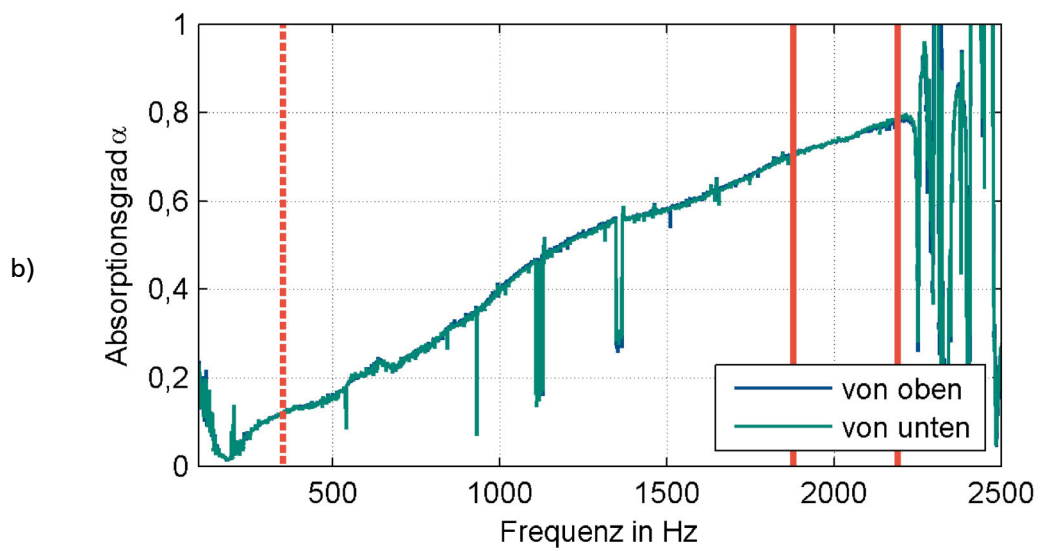
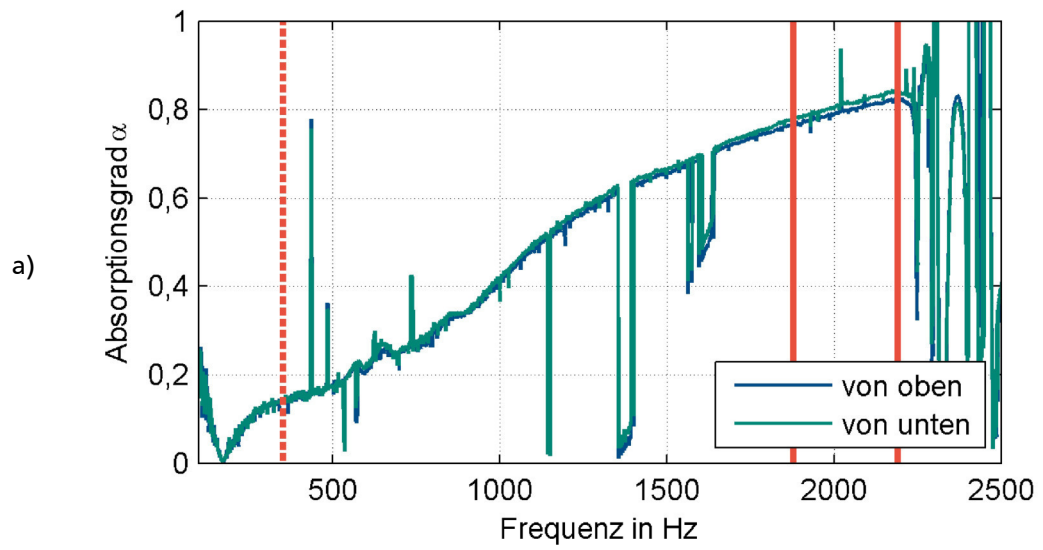


Abbildung B-30: Auswirkung verschiedener Einbaumöglichkeiten der Probe in den Probenhalter auf den Absorptionsgrad bei der Probendicke 80 mm für verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm



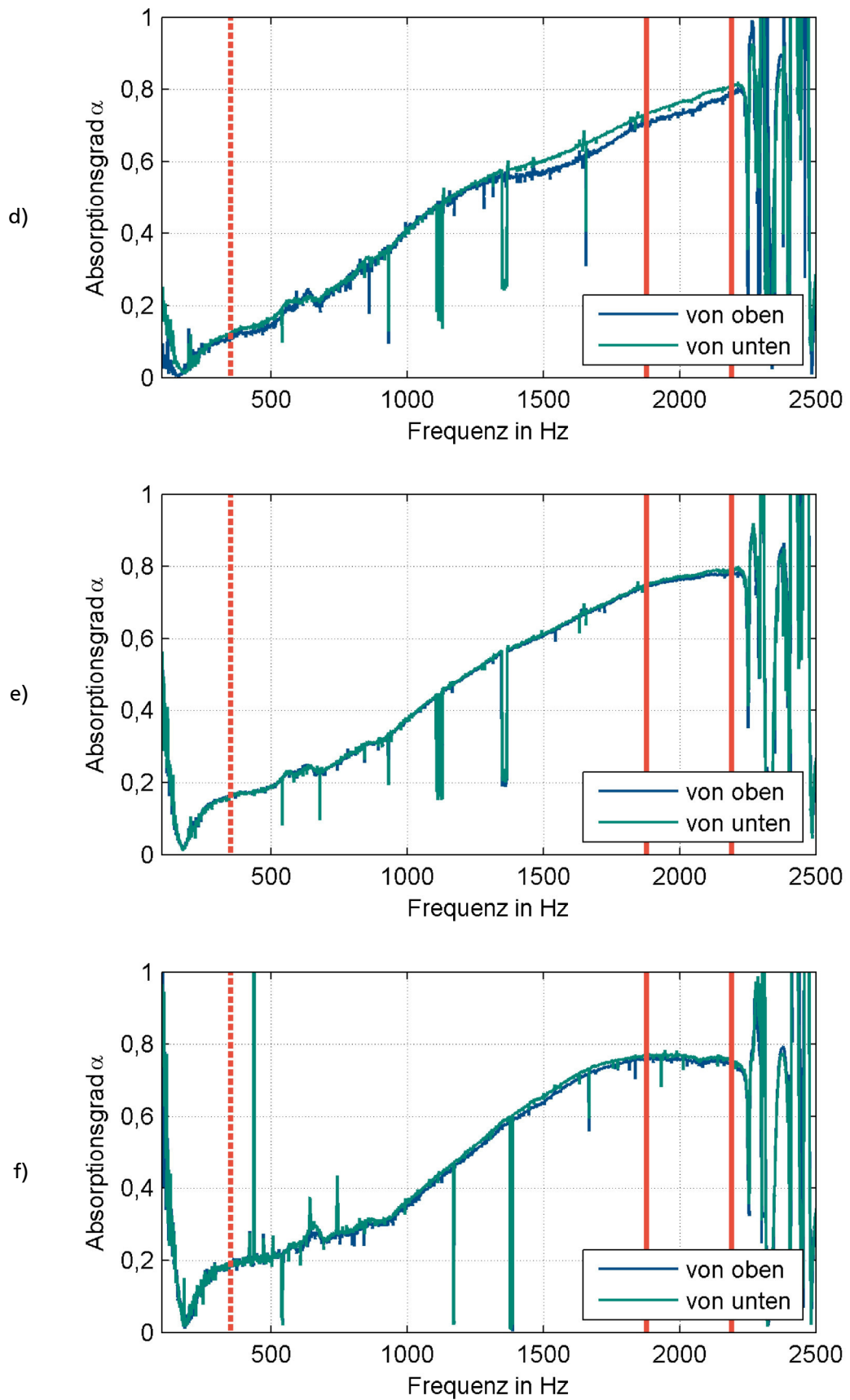


Abbildung B-31: Abhängigkeit des Absorptionsgrades von der Einbaurichtung, dem Probendurchmesser und dem Zuschnitt, 30 mm Material, a) HZD; b) SLF; c) SLH; d) SSF; e) SSH; f) WSS

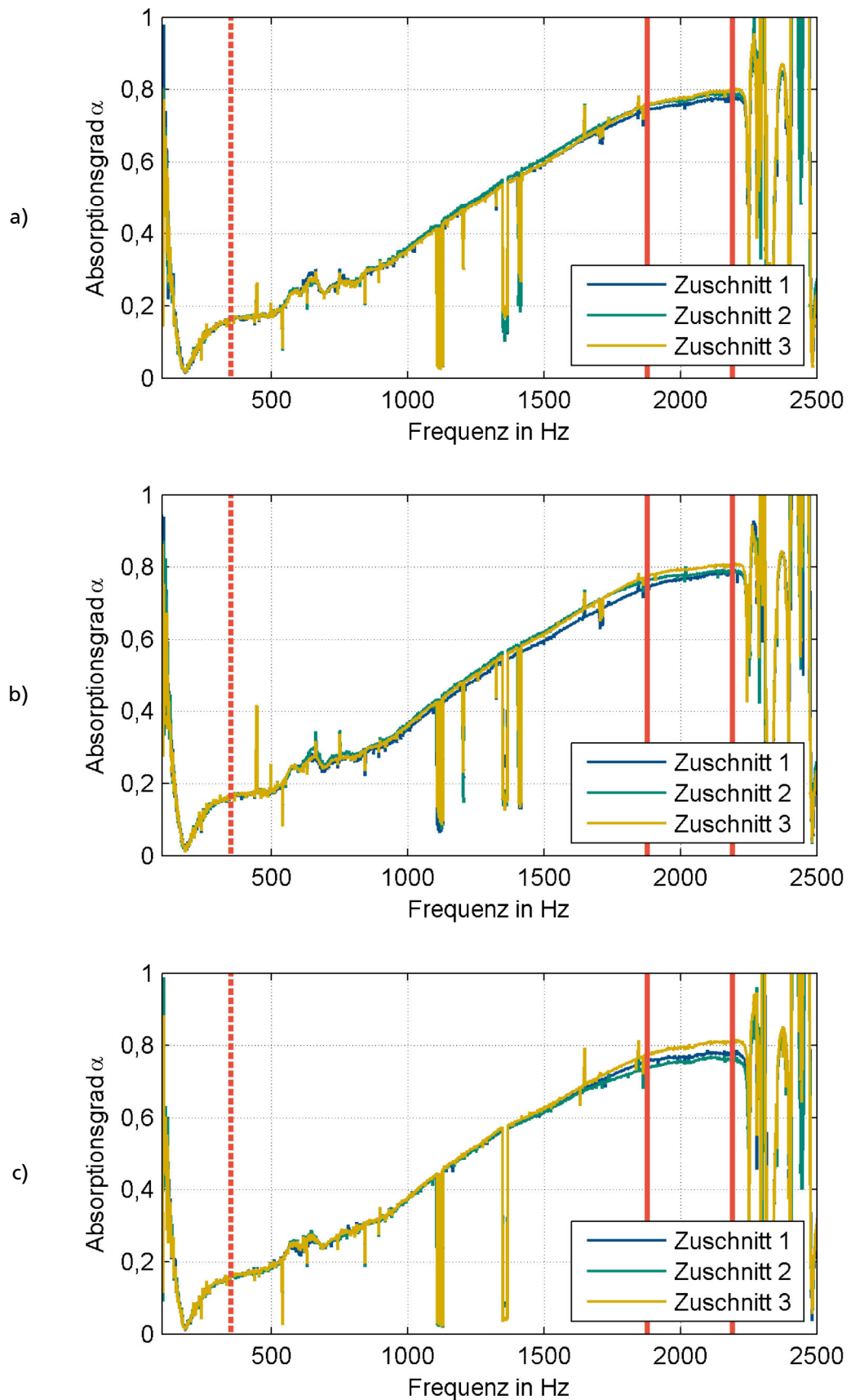


Abbildung B-32: Absorptionsgrad über Frequenz für 30 mm dicke Proben, gefertigt von Person 1 an der Bandsäge (alle Sägeverfahren) in Abhängigkeit von der Probennummer zum Nachweis eines Lerneffekts beim Zuschnitt für verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm

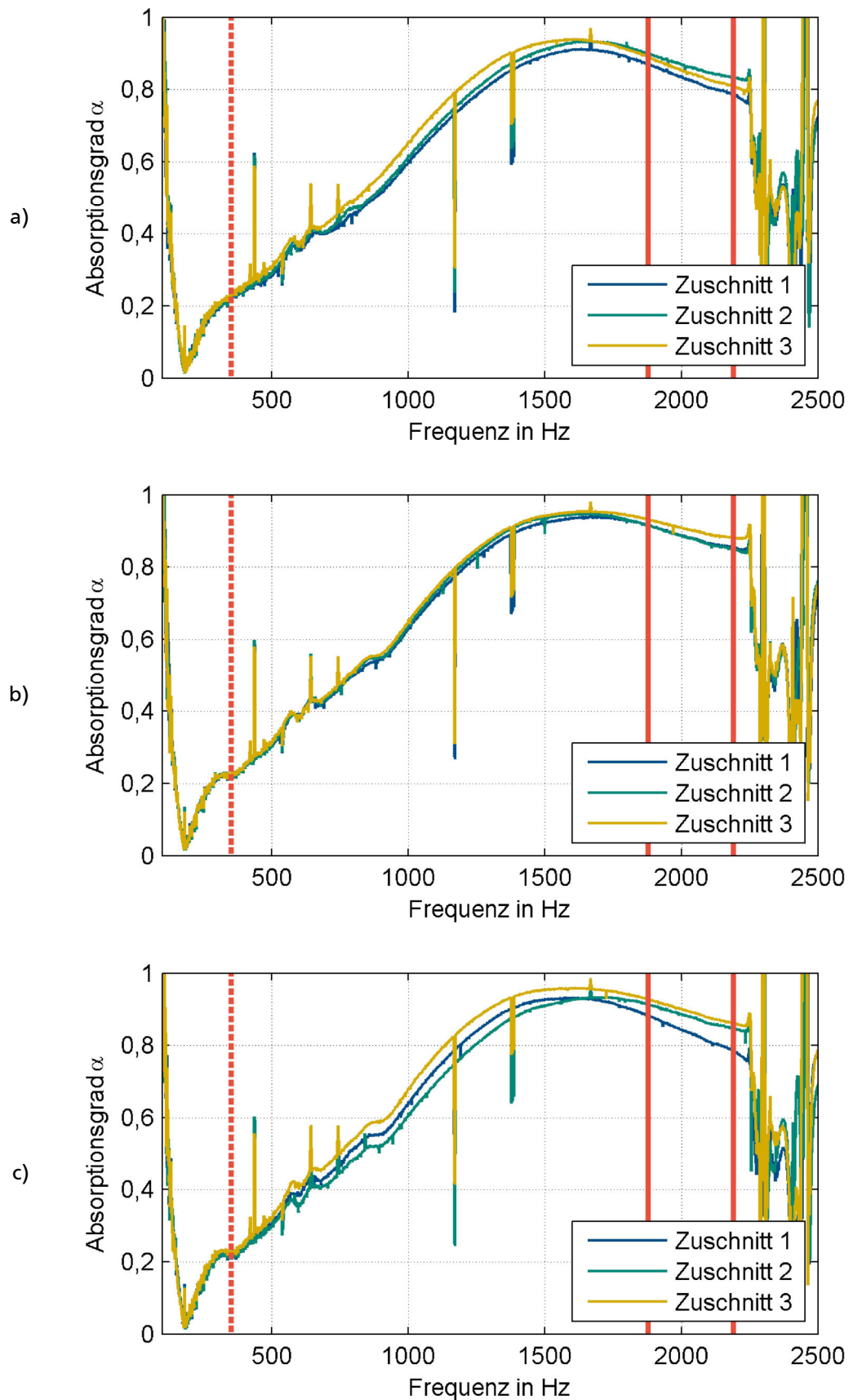


Abbildung B-33: Absorptionsgrad über Frequenz für 40 mm dicke Proben, gefertigt von Person 1 an der Bandsäge (alle Sägeverfahren) in Abhängigkeit von der Probennummer zum Nachweis eines Lerneffekts beim Zuschnitt für verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm

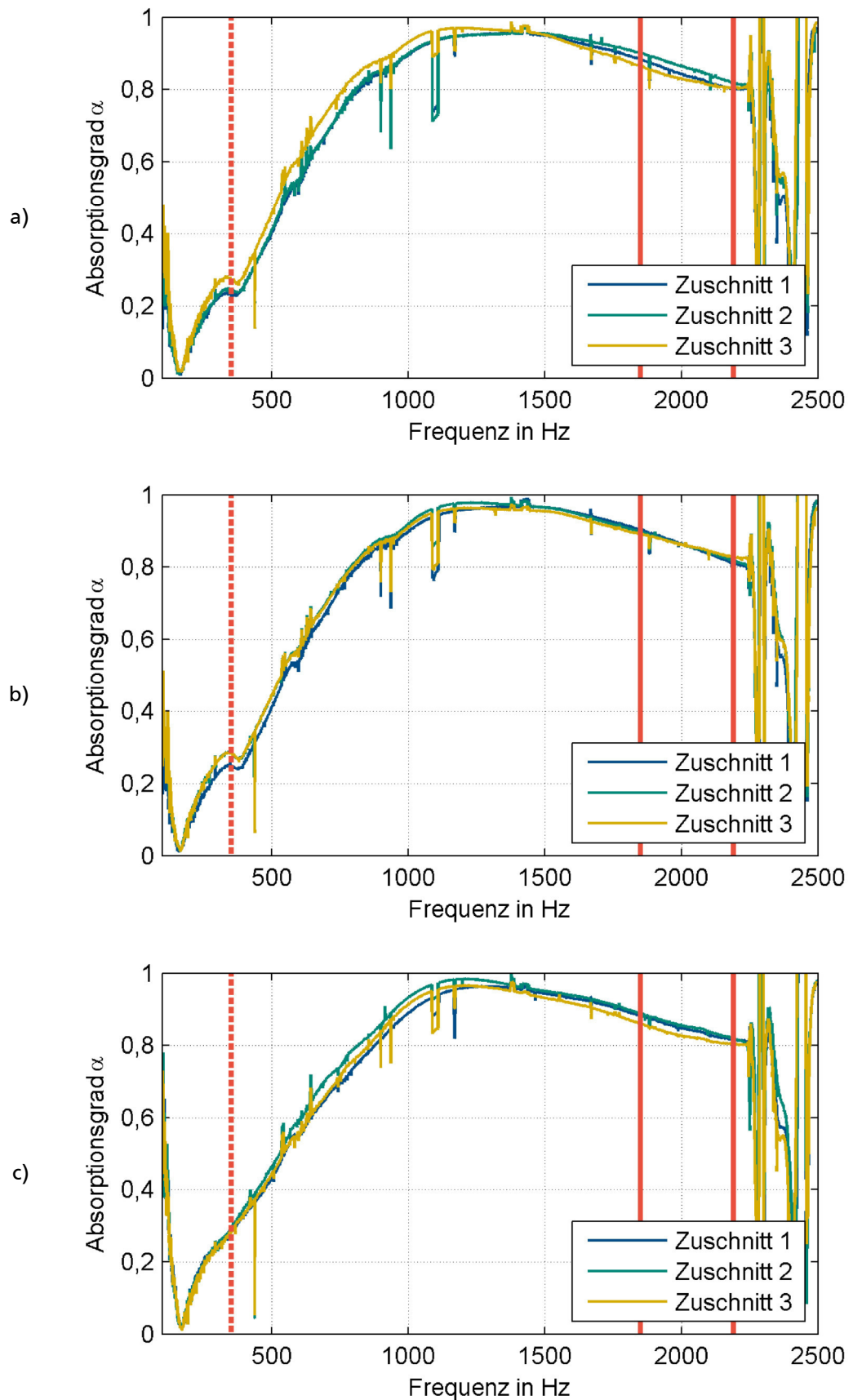


Abbildung B-34: Absorptionsgrad über Frequenz für 50 mm dicke Proben, gefertigt von Person 1 an der Bandsäge (alle Sägeverfahren) in Abhängigkeit von der Probennummer zum Nachweis eines Lerneffekts beim Zuschnitt für verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm

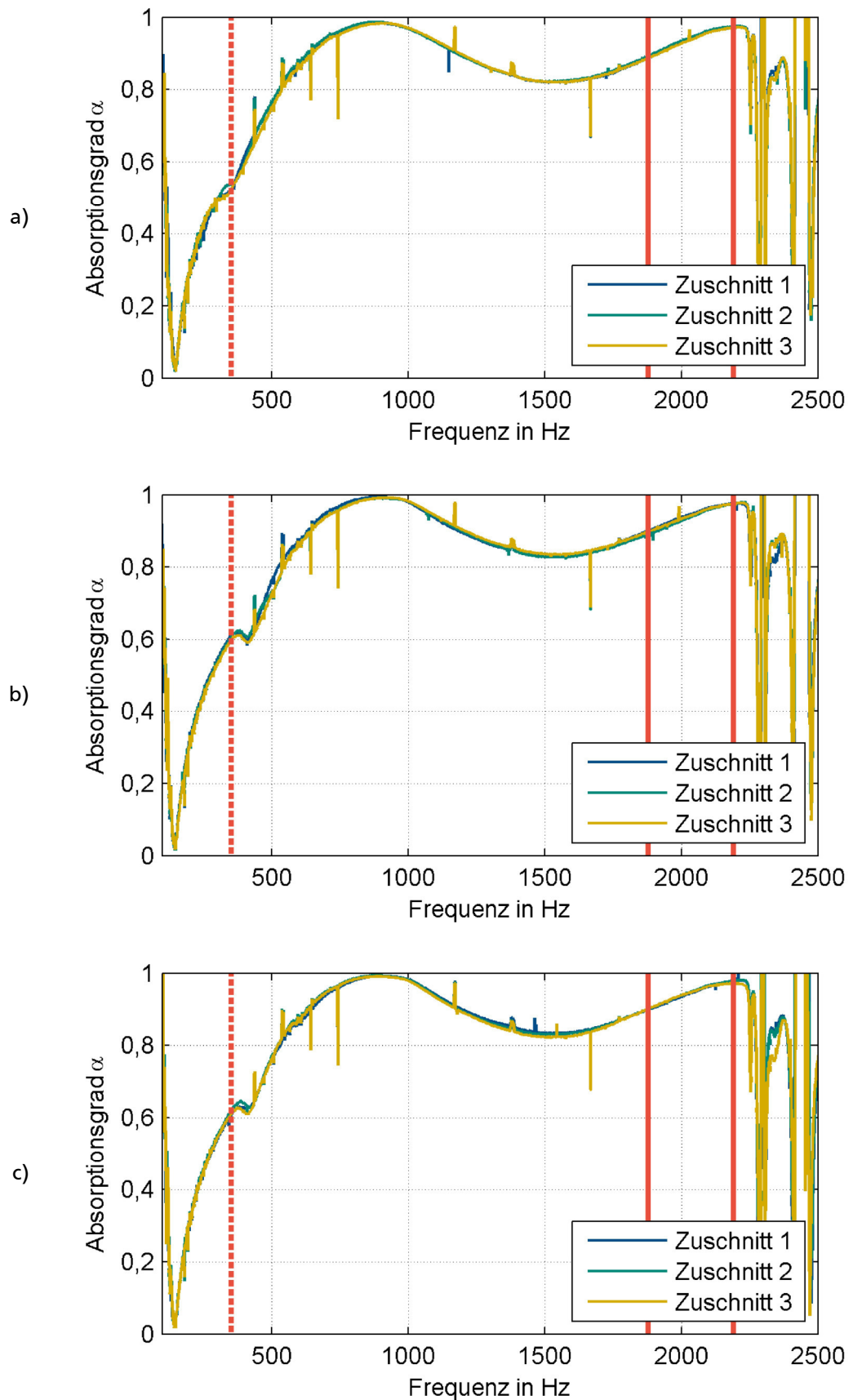


Abbildung B-35: Absorptionsgrad über Frequenz für 80 mm dicke Proben, gefertigt von Person 1 an der Bandsäge (alle Sägeverfahren) in Abhängigkeit von der Probennummer zum Nachweis eines Lerneffekts beim Zuschnitt für verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm

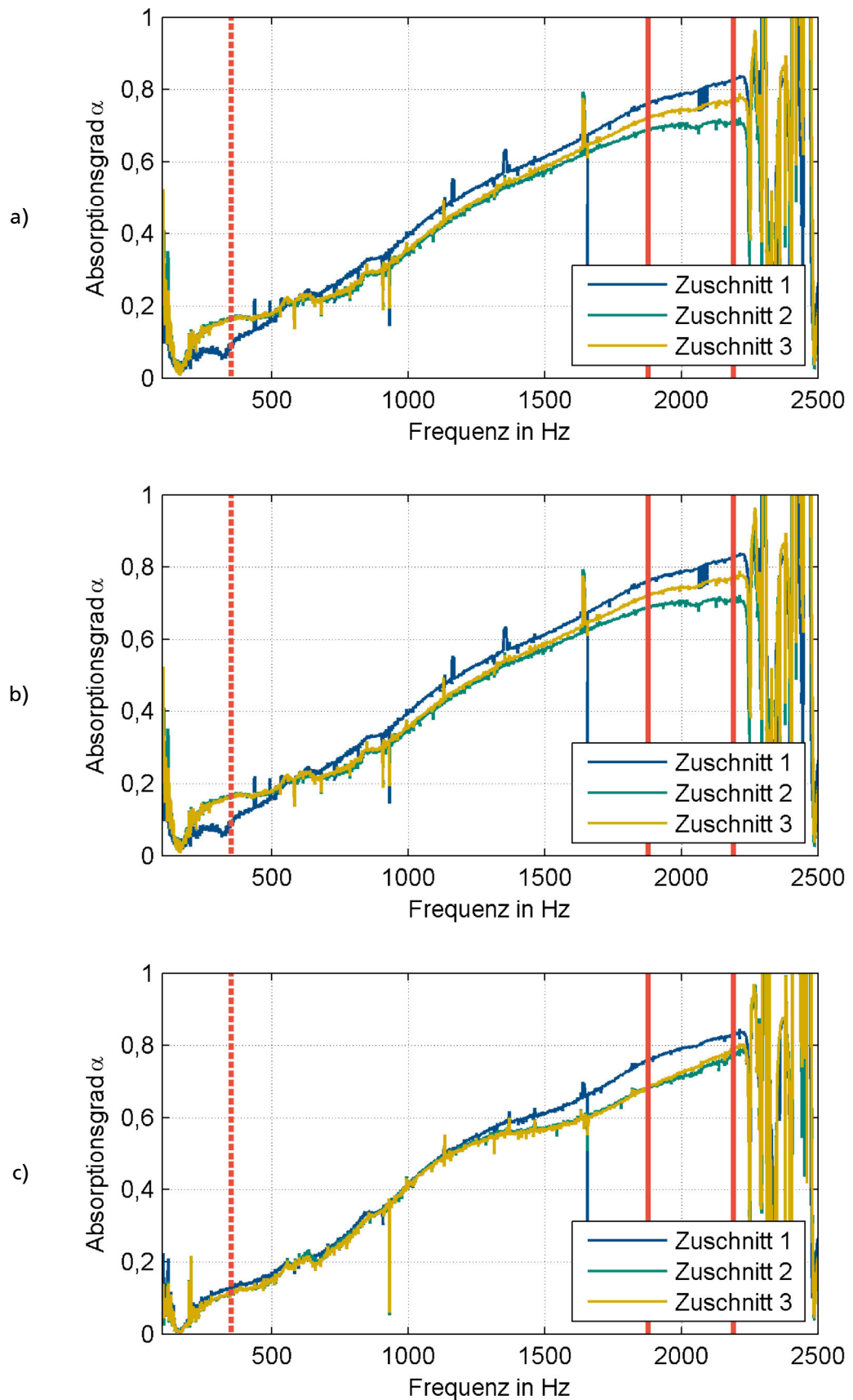


Abbildung B-36: Absorptionsgrad über Frequenz für 30 mm dicke Proben, gefertigt von Person B an der Bandsäge (alle Sägeverfahren) in Abhängigkeit von der Probennummer zum Nachweis eines Lerneffekts beim Zuschnitt für verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm

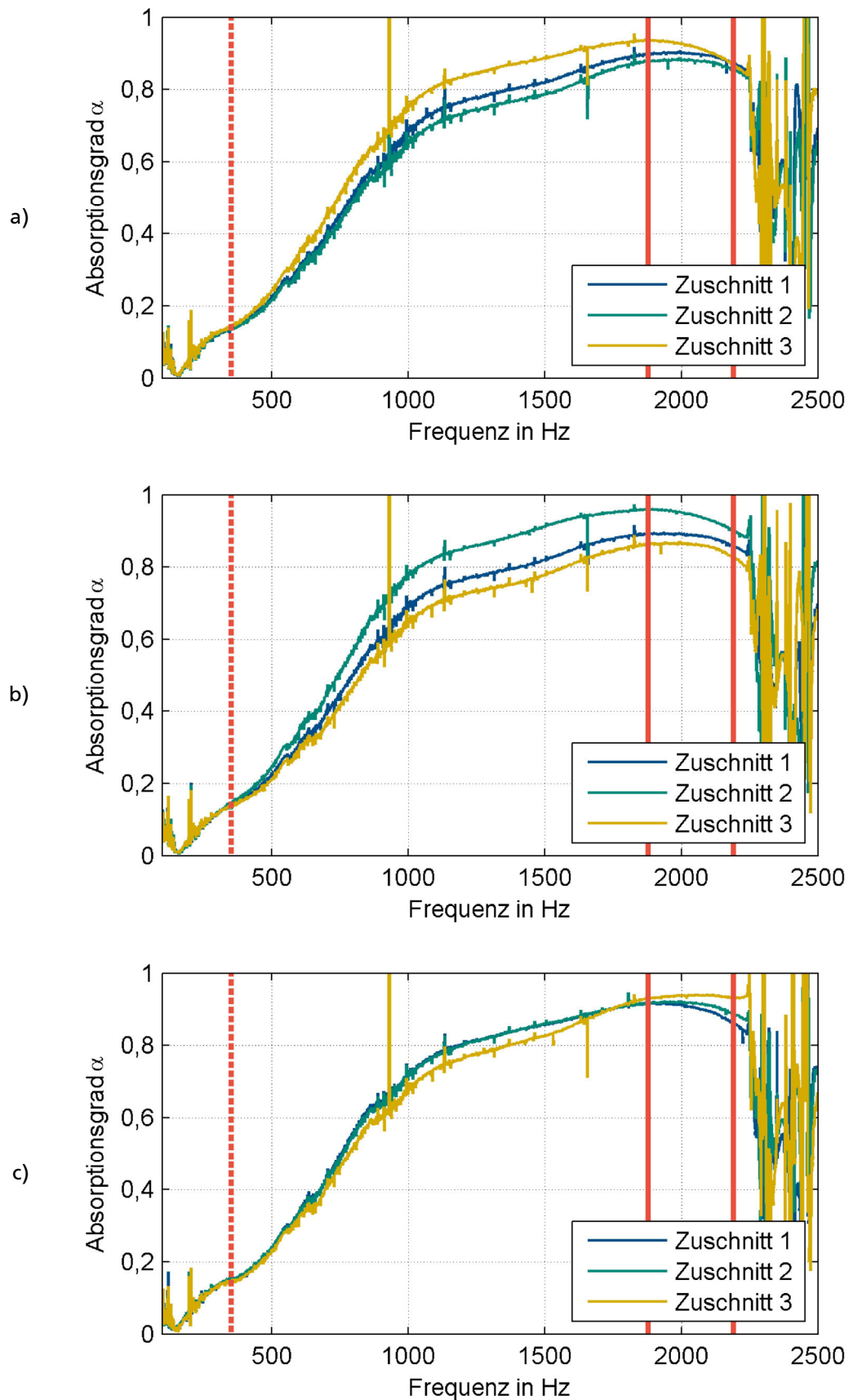


Abbildung B-37: Absorptionsgrad über Frequenz für 40 mm dicke Proben, gefertigt von Person B an der Bandsäge (alle Sägeverfahren) in Abhängigkeit von der Probennummer zum Nachweis eines Lerneffekts beim Zuschnitt für verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm

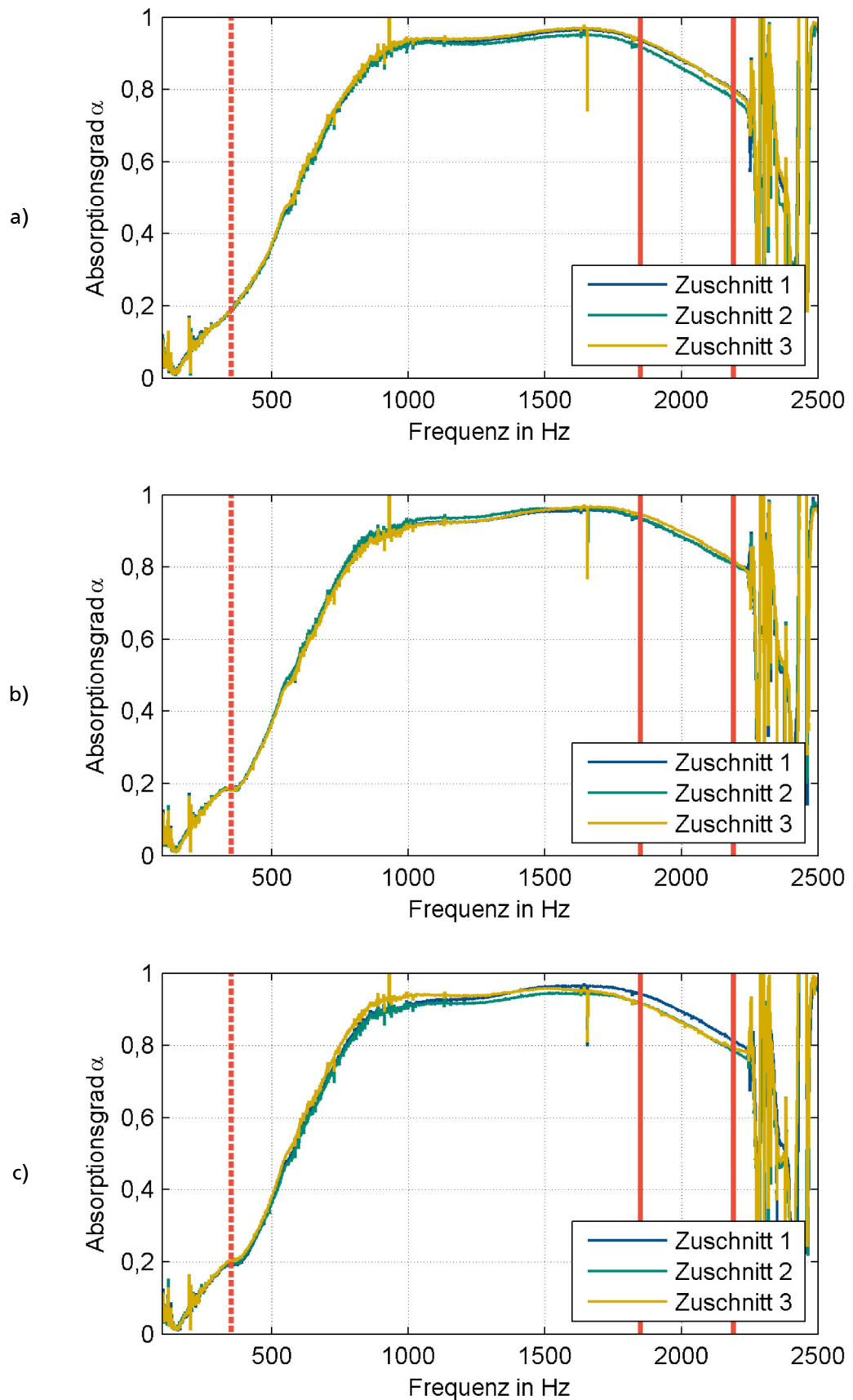


Abbildung B-38: Absorptionsgrad über Frequenz für 50 mm dicke Proben, gefertigt von Person B an der Bandsäge (alle Sägeverfahren) in Abhängigkeit von der Probennummer zum Nachweis eines Lerneffekts beim Zuschnitt für verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm

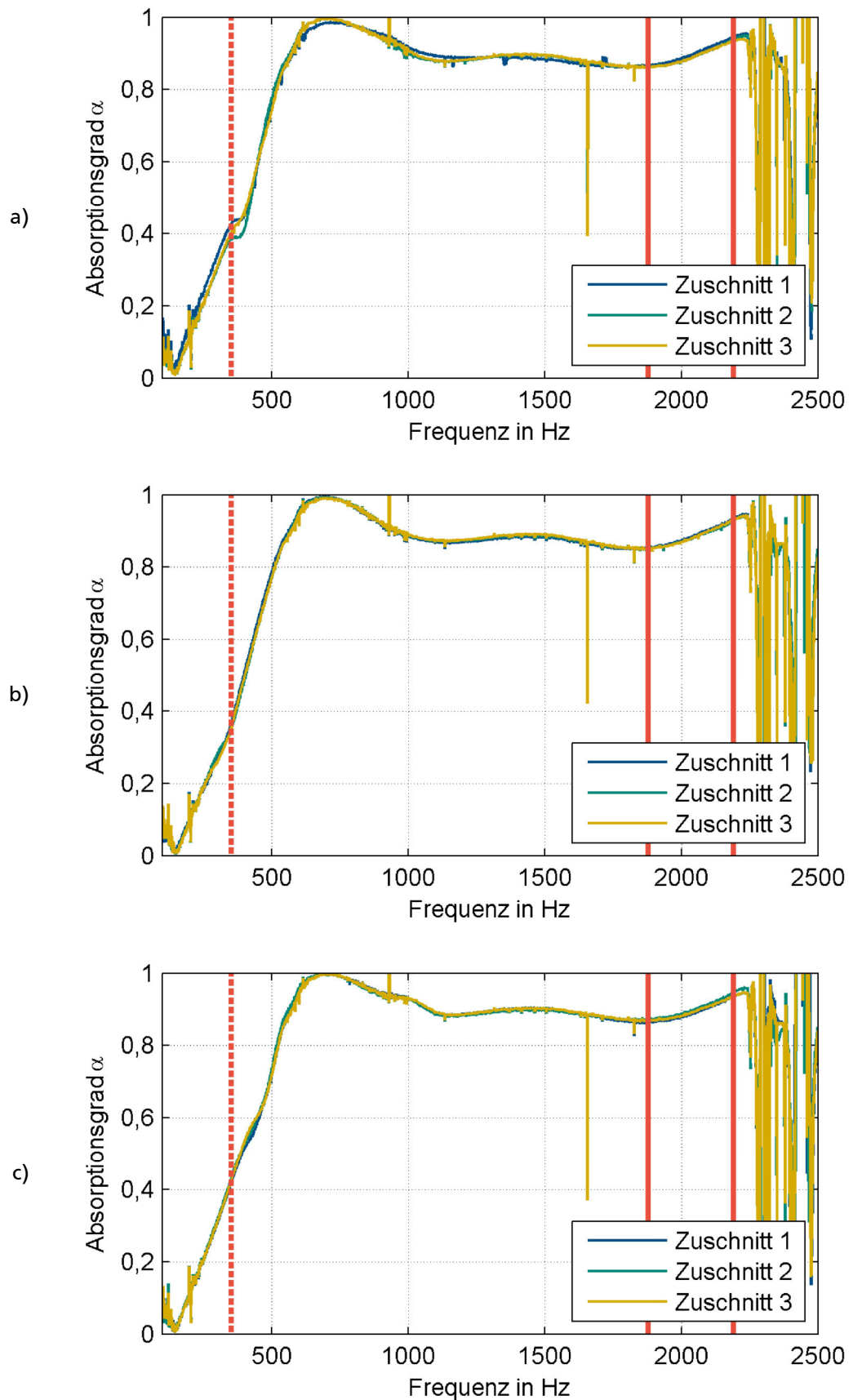


Abbildung B-39: Absorptionsgrad über Frequenz für 80 mm dicke Proben, gefertigt von Person B an der Bandsäge (alle Sägeverfahren) in Abhängigkeit von der Probennummer zum Nachweis eines Lerneffekts beim Zuschnitt für verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm

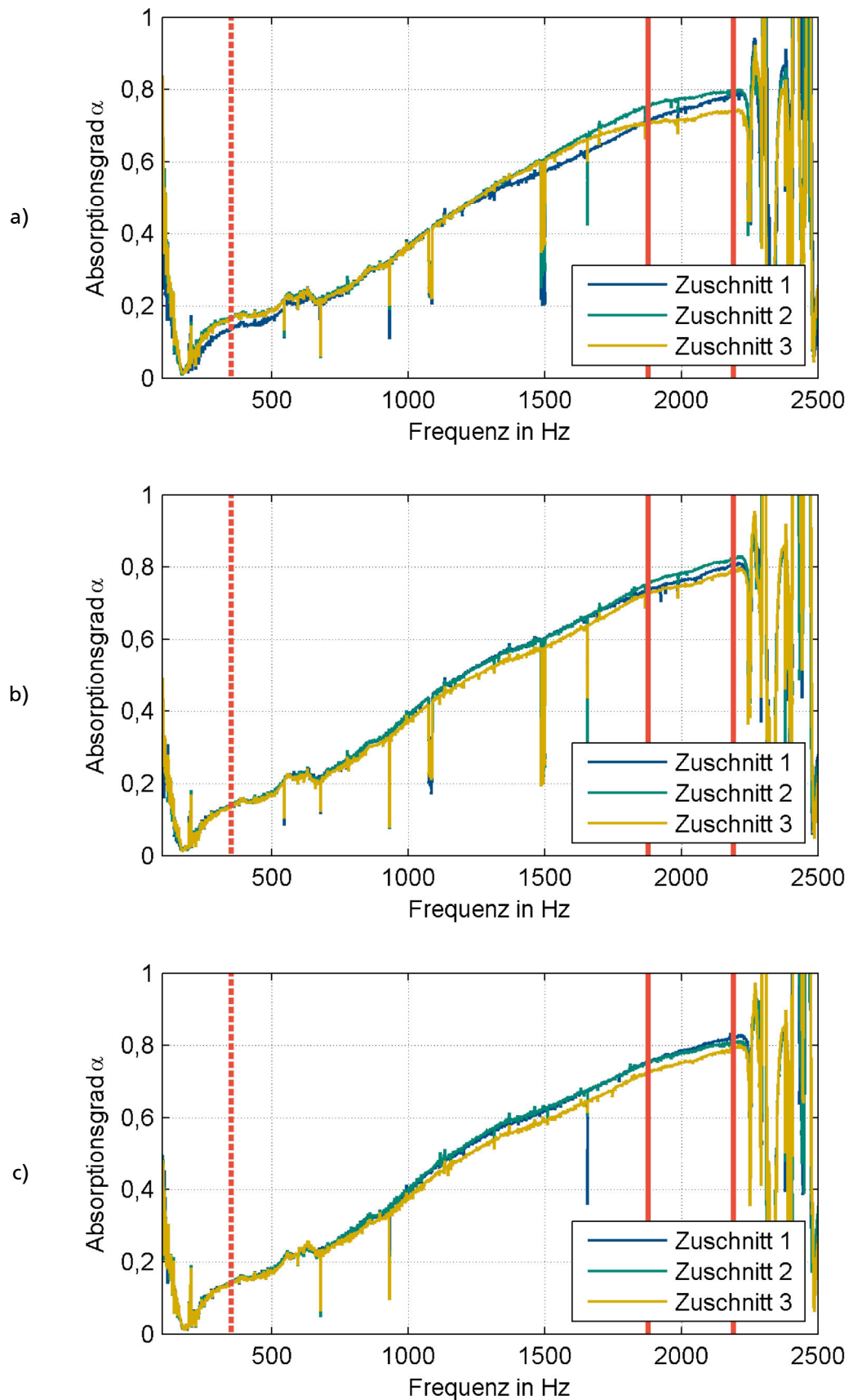


Abbildung B-40: Absorptionsgrad über Frequenz für 30 mm dicke Proben, gefertigt von Person C an der Bandsäge (alle Sägeverfahren) in Abhängigkeit von der Probennummer zum Nachweis eines Lerneffekts beim Zuschnitt für verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm

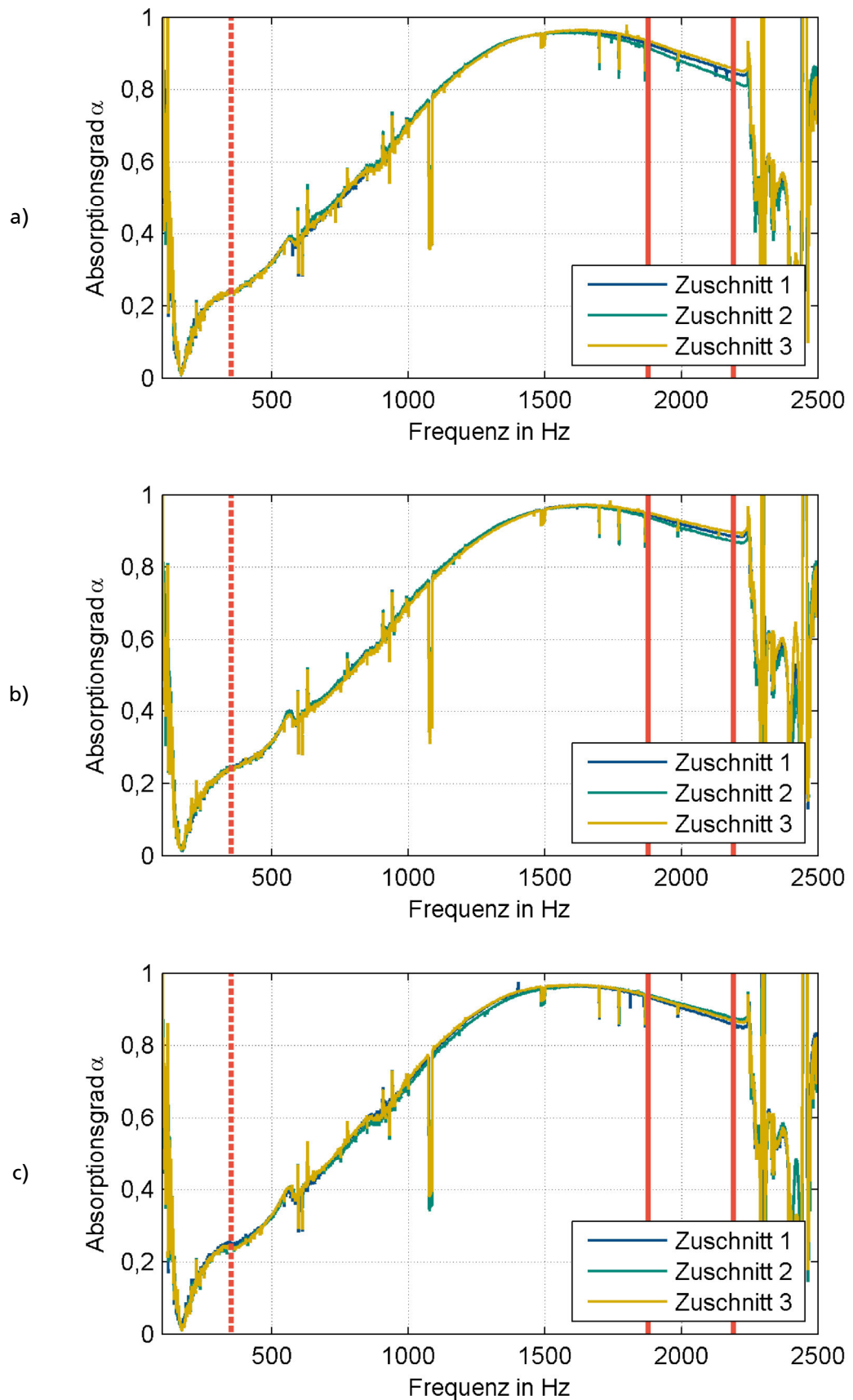


Abbildung B-41: Absorptionsgrad über Frequenz für 40 mm dicke Proben, gefertigt von Person C an der Bandsäge (alle Sägeverfahren) in Abhängigkeit von der Probennummer zum Nachweis eines Lerneffekts beim Zuschnitt für verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm

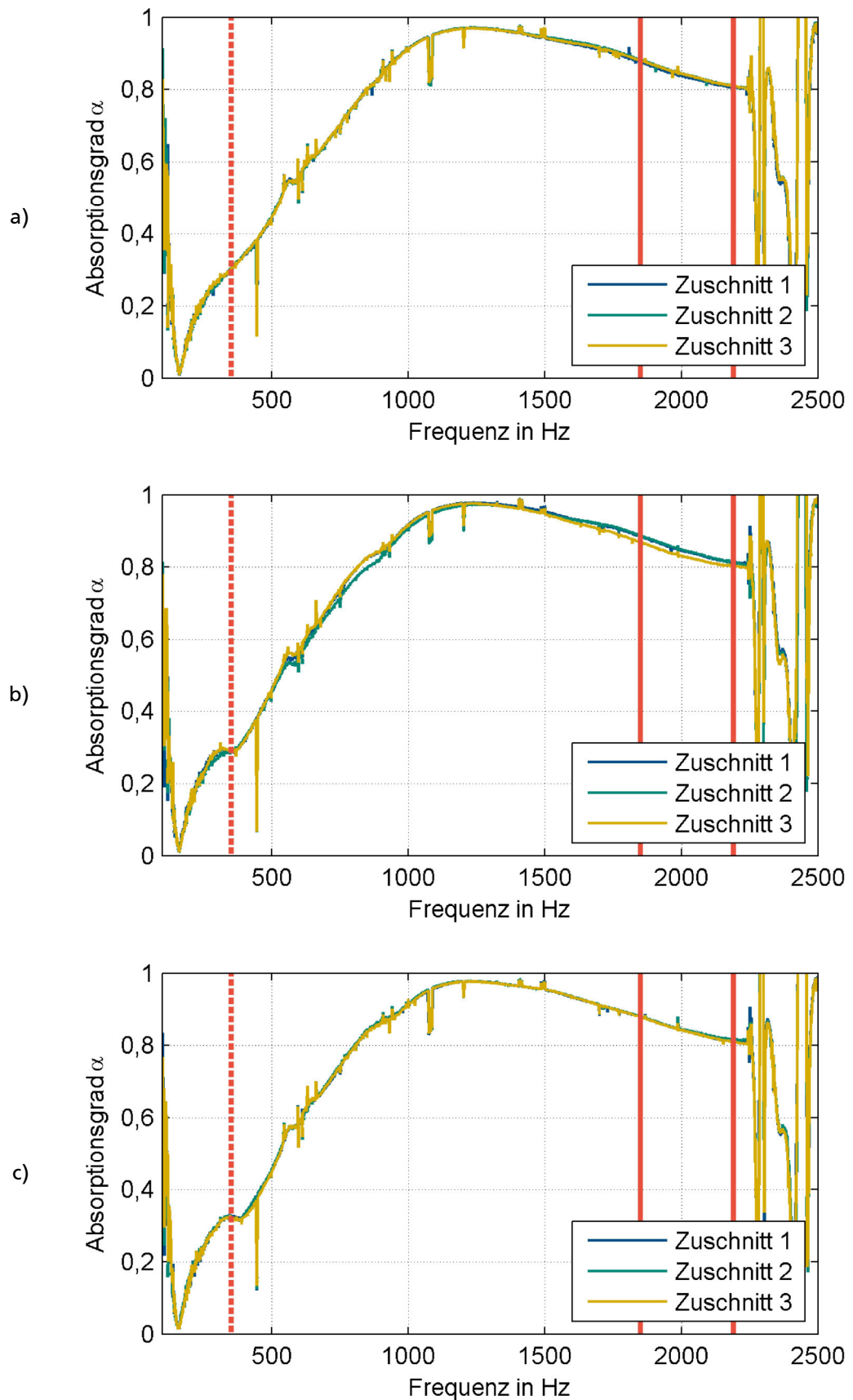


Abbildung B-42: Absorptionsgrad über Frequenz für 50 mm dicke Proben, gefertigt von Person C an der Bandsäge (alle Sägeverfahren) in Abhängigkeit von der Probennummer zum Nachweis eines Lerneffekts beim Zuschnitt für verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm

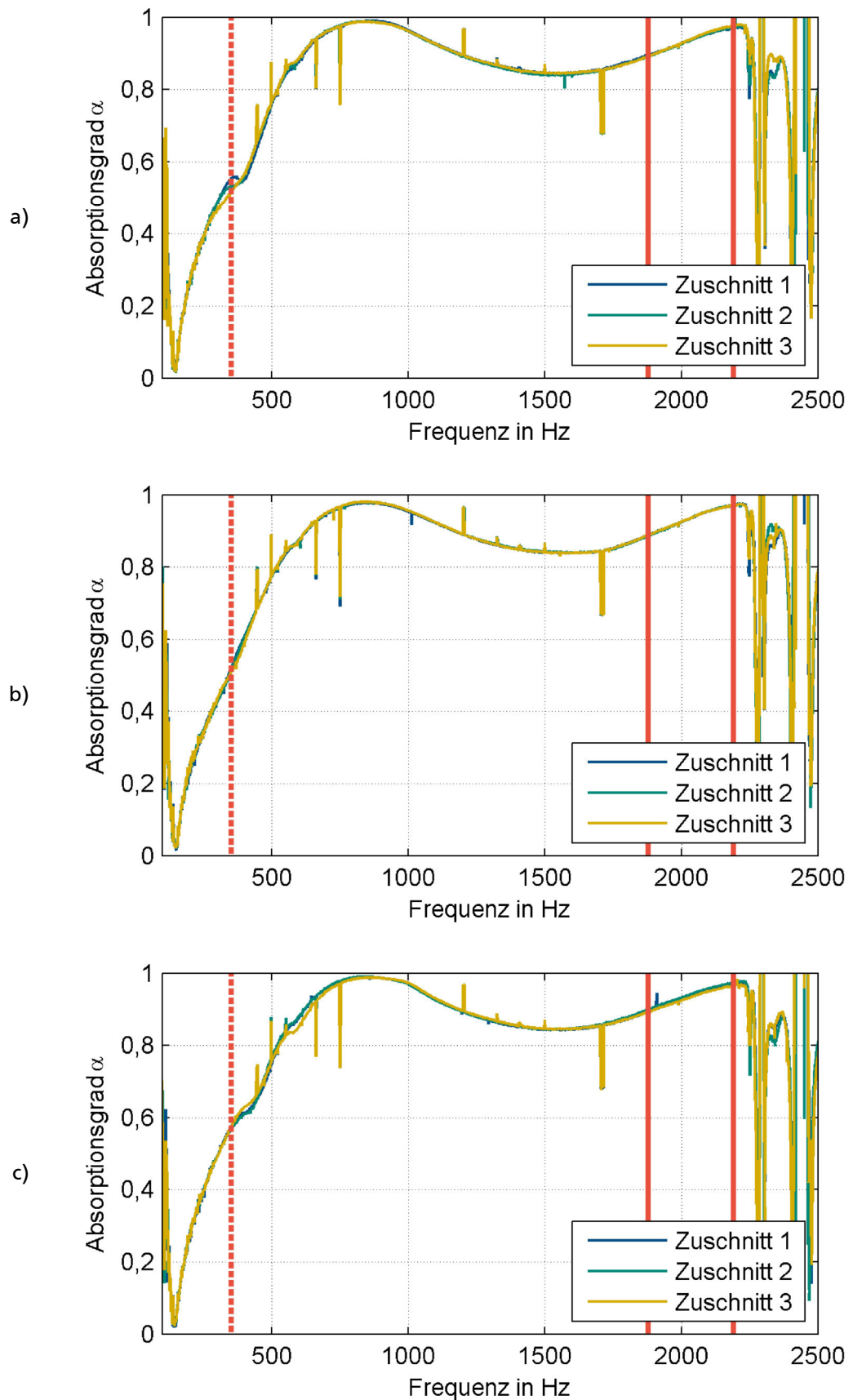


Abbildung B-43: Absorptionsgrad über Frequenz für 80 mm dicke Proben, gefertigt von Person C an der Bandsäge (alle Sägeverfahren) in Abhängigkeit von der Probennummer zum Nachweis eines Lerneffekts beim Zuschnitt für verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm

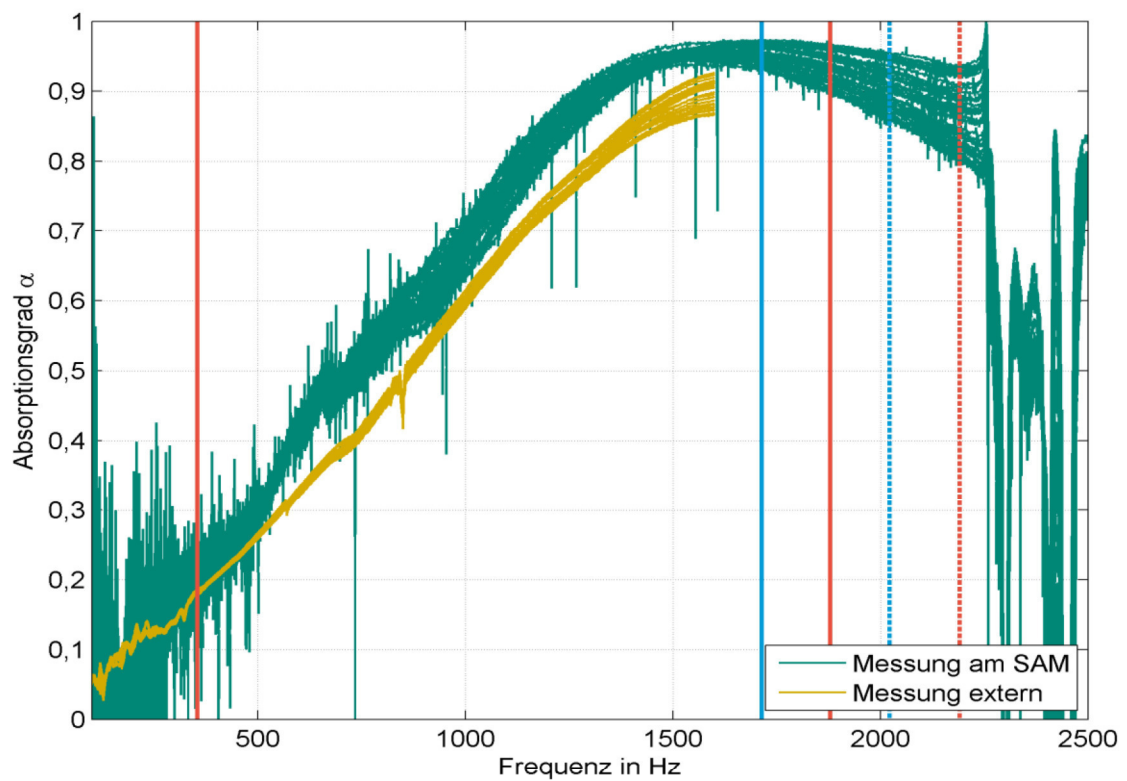


Abbildung B-44: Absorptionsgrad über Frequenz, bestimmt am FG SAM (grün), mit einer Probe des Durchmessers 90 mm und an einem vergleichbaren Messsystem bei einem externen Partner (gelb) mit einer Probe entsprechend dem Durchmesser des Messsystems von 100 mm, Probendicke 40 mm; jeweils 36 Messwiederholungen, wobei die Proben jeweils um 10° gedreht um die Rohrlängsachse in den Probenhalter wurden

C Anhang zur statistischen Versuchsauswertung

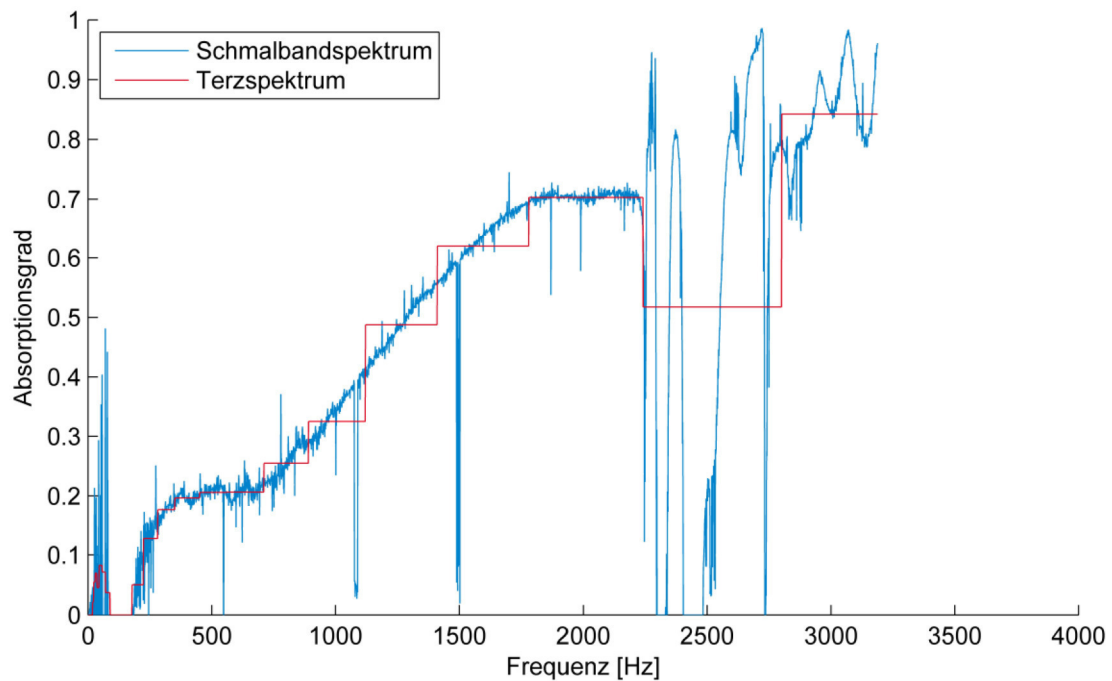


Abbildung C-1: Schmalbandspektrum und Terzspektrum des Absorptionsgrades (aus [112])

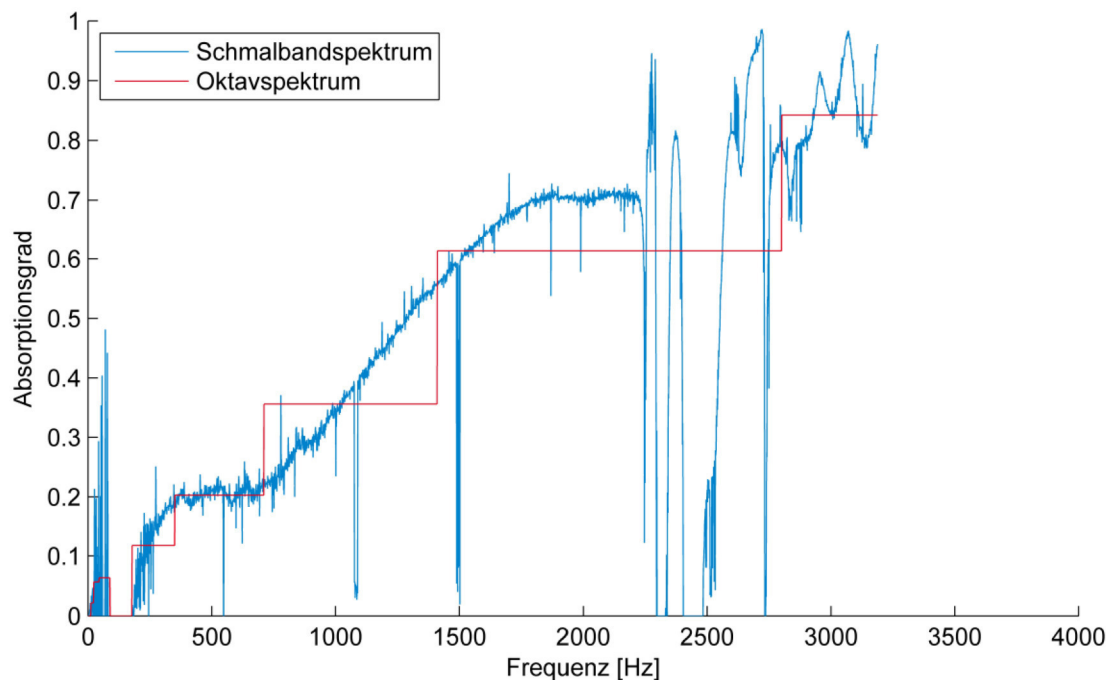


Abbildung C-2: Schmalbandspektrum und Oktavspektrum des Absorptionsgrades (aus [112])

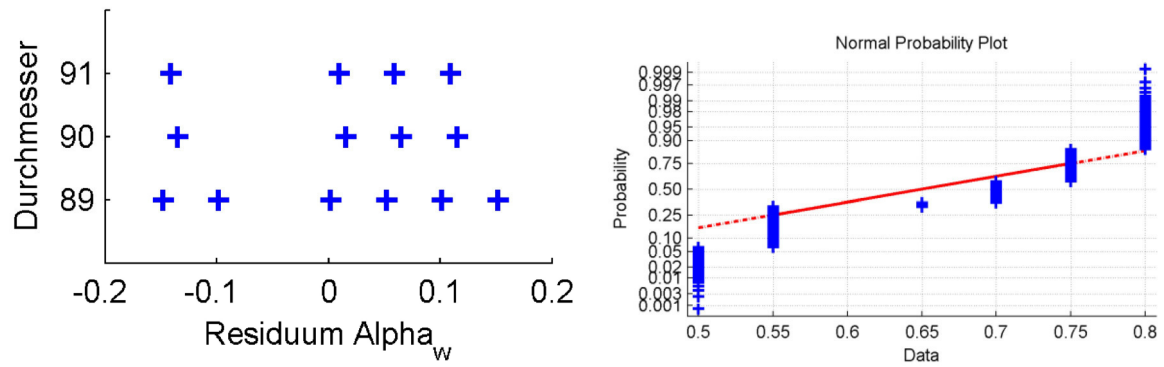


Abbildung C-3: Nachweis: Gleichheit der Residuen (links) und Nachweis der Normalverteilung (rechts) der Zielgröße; Probendicke 80 mm, Zielgröße α_w

Tabelle C-1: Ergebnis der Berechnung der Varianzanalyse; Versuchsplan 1; Zielgröße α_w

Source	TSS	d.f.	Mean Sq.	F	Prob>F
Probendicke	45,4	3,000	15,148	42202,772	0
Durchmesser	0,2	2,000	0,077	214,226	0
Zuschnittsart	0,1	3,000	0,019	53,191	0
Einbaurichtung	0,0	1,000	0,004	10,329	0,0013
Person	4,7	2,000	2,327	6482,427	0
ProbenNr	0,0	2,000	0,002	5,404	0,0046
Probendicke*Durchmesser	0,1	6,000	0,023	63,381	0
Probendicke*Zuschnittsart	0,0	9,000	0,005	13,056	0
Probendicke*Einbaurichtung	0,0	3,000	0,000	0,620	0,6021
Probendicke*Person	2,8	6,000	0,474	1319,287	0
Probendicke*ProbenNr	0,0	6,000	0,004	11,573	0
Durchmesser*Zuschnittsart	0,0	6,000	0,007	20,179	0
Durchmesser*Einbaurichtung	0,0	2,000	0,000	0,374	0,6884
Durchmesser*Person	0,0	4,000	0,006	17,310	0
Durchmesser*ProbenNr	0,0	4,000	0,001	3,654	0,0057
Zuschnittsart*Einbaurichtung	0,0	3,000	0,000	0,075	0,9733
Zuschnittsart*Person	0,0	6,000	0,005	13,822	0
Zuschnittsart*ProbenNr	0,0	6,000	0,004	10,087	0
Einbaurichtung*Person	0,0	2,000	0,000	1,002	0,3672
Einbaurichtung*ProbenNr	0,0	2,000	0,000	0,357	0,6995
Person*ProbenNr	0,0	4,000	0,002	4,888	0,0006
Probendicke*Durchmesser*Zuschnittsart	0,1	18,000	0,004	11,244	0
Probendicke*Durchmesser*Einbaurichtung	0,0	6,000	0,000	0,123	0,9937
Probendicke*Durchmesser*Person	0,1	12,000	0,005	13,774	0
Probendicke*Durchmesser*ProbenNr	0,0	12,000	0,002	6,831	0
Probendicke*Zuschnittsart*Einbaurichtung	0,0	9,000	0,000	0,398	0,9367
Probendicke*Zuschnittsart*Person	0,1	18,000	0,006	16,179	0
Probendicke*Zuschnittsart*ProbenNr	0,0	18,000	0,001	3,745	0
Probendicke*Einbaurichtung*Person	0,0	6,000	0,000	0,773	0,5911
Probendicke*Einbaurichtung*ProbenNr	0,0	6,000	0,000	0,386	0,8883
Probendicke*Person*ProbenNr	0,0	12,000	0,001	3,281	0,0001
Durchmesser*Zuschnittsart*Einbaurichtung	0,0	6,000	0,000	0,309	0,9325
Durchmesser*Zuschnittsart*Person	0,0	12,000	0,004	10,557	0
Durchmesser*Zuschnittsart*ProbenNr	0,0	12,000	0,002	6,241	0
Durchmesser*Einbaurichtung*Person	0,0	4,000	0,000	0,188	0,9447
Durchmesser*Einbaurichtung*ProbenNr	0,0	4,000	0,000	0,172	0,9528
Durchmesser*Person*ProbenNr	0,0	8,000	0,001	3,247	0,0011
Zuschnittsart*Einbaurichtung*Person	0,0	6,000	0,000	0,615	0,7182
Zuschnittsart*Einbaurichtung*ProbenNr	0,0	6,000	0,000	0,368	0,8994
Zuschnittsart*Person*ProbenNr	0,0	12,000	0,002	5,180	0
Einbaurichtung*Person*ProbenNr	0,0	4,000	0,000	0,535	0,7102
Error	0,8	2318,000	0,000		
Total	54,7	2591,000			

Tabelle C-2: Ergebnis der Berechnung der Varianzanalyse; Versuchsplan 1; Zielgröße Mittelwert

Source	TSS	d.f.	Mean Sq.	F	Prob>F
Probendicke	45,1396	3	15,0465	42204,1085	0,0000
Durchmesser	0,0409	2	0,0205	57,3797	0,0000
Zuschnittsart	0,0026	3	0,0009	2,4293	0,0635
Einbaurichtung	0,0034	1	0,0034	9,6680	0,0019
Person	0,1819	2	0,0909	255,0973	0,0000
ProbenNr	0,0011	2	0,0006	1,5931	0,2035
Probendicke*Durchmesser	0,0049	6	0,0008	2,2827	0,0336
Probendicke*Zuschnittsart	0,0248	9	0,0028	7,7290	0,0000
Probendicke*Einbaurichtung	0,0014	3	0,0005	1,2958	0,2741
Probendicke*Person	0,1031	6	0,0172	48,2128	0,0000
Probendicke*ProbenNr	0,0202	6	0,0034	9,4198	0,0000
Durchmesser*Zuschnittsart	0,0250	6	0,0042	11,6805	0,0000
Durchmesser*Einbaurichtung	0,0005	2	0,0003	0,7640	0,4659
Durchmesser*Person	0,0029	4	0,0007	2,0629	0,0832
Durchmesser*ProbenNr	0,0228	4	0,0057	16,0057	0,0000
Zuschnittsart*Einbaurichtung	0,0000	3	0,0000	0,0351	0,9912
Zuschnittsart*Person	0,0089	6	0,0015	4,1518	0,0004
Zuschnittsart*ProbenNr	0,0058	6	0,0010	2,7080	0,0127
Einbaurichtung*Person	0,0001	2	0,0000	0,0762	0,9266
Einbaurichtung*ProbenNr	0,0000	2	0,0000	0,0205	0,9797
Person*ProbenNr	0,0239	4	0,0060	16,7460	0,0000
Probendicke*Durchmesser*Zuschnittsart	0,0704	18	0,0039	10,9740	0,0000
Probendicke*Durchmesser*Einbaurichtung	0,0008	6	0,0001	0,3918	0,8847
Probendicke*Durchmesser*Person	0,0248	12	0,0021	5,7891	0,0000
Probendicke*Durchmesser*ProbenNr	0,0263	12	0,0022	6,1389	0,0000
Probendicke*Zuschnittsart*Einbaurichtung	0,0001	9	0,0000	0,0319	1,0000
Probendicke*Zuschnittsart*Person	0,0399	18	0,0022	6,2215	0,0000
Probendicke*Zuschnittsart*ProbenNr	0,0639	18	0,0036	9,9578	0,0000
Probendicke*Einbaurichtung*Person	0,0000	6	0,0000	0,0219	1,0000
Probendicke*Einbaurichtung*ProbenNr	0,0001	6	0,0000	0,0247	0,9999
Probendicke*Person*ProbenNr	0,0456	12	0,0038	10,6486	0,0000
Durchmesser*Zuschnittsart*Einbaurichtung	0,0003	6	0,0000	0,1343	0,9919
Durchmesser*Zuschnittsart*Person	0,0645	12	0,0054	15,0739	0,0000
Durchmesser*Zuschnittsart*ProbenNr	0,0488	12	0,0041	11,4084	0,0000
Durchmesser*Einbaurichtung*Person	0,0001	4	0,0000	0,0928	0,9848
Durchmesser*Einbaurichtung*ProbenNr	0,0001	4	0,0000	0,0425	0,9966
Durchmesser*Person*ProbenNr	0,0275	8	0,0034	9,6427	0,0000
Zuschnittsart*Einbaurichtung*Person	0,0001	6	0,0000	0,0553	0,9993
Zuschnittsart*Einbaurichtung*ProbenNr	0,0001	6	0,0000	0,0591	0,9992
Zuschnittsart*Person*ProbenNr	0,0287	12	0,0024	6,7017	0,0000
Einbaurichtung*Person*ProbenNr	0,0000	4	0,0000	0,0174	0,9994
Error	0,8264	2318	0,0004		
Total	46,8824	2591			

Tabelle C-3: Ergebnis der Berechnung der Varianzanalyse; Versuchsplan 1; Zielgröße mittlere absolute Abweichung

Source	TSS	d.f.	Mean Sq.	F	Prob>F
Probendicke	2,8933	3	0,9644	14580,064	0,0000
Durchmesser	0,0019	2	0,0009	14,261	0,0000
Zuschnittsart	0,0037	3	0,0012	18,711	0,0000
Einbaurichtung	0,0002	1	0,0002	3,099	0,0785
Person	0,0959	2	0,0480	725,087	0,0000
ProbenNr	0,0002	2	0,0001	1,705	0,1820
Probendicke*Durchmesser	0,0037	6	0,0006	9,267	0,0000
Probendicke*Zuschnittsart	0,0035	9	0,0004	5,894	0,0000
Probendicke*Einbaurichtung	0,0008	3	0,0003	3,878	0,0089
Probendicke*Person	0,1565	6	0,0261	394,371	0,0000
Probendicke*ProbenNr	0,0064	6	0,0011	16,091	0,0000
Durchmesser*Zuschnittsart	0,0025	6	0,0004	6,420	0,0000
Durchmesser*Einbaurichtung	0,0000	2	0,0000	0,328	0,7205
Durchmesser*Person	0,0028	4	0,0007	10,442	0,0000
Durchmesser*ProbenNr	0,0057	4	0,0014	21,436	0,0000
Zuschnittsart*Einbaurichtung	0,0000	3	0,0000	0,037	0,9907
Zuschnittsart*Person	0,0038	6	0,0006	9,504	0,0000
Zuschnittsart*ProbenNr	0,0019	6	0,0003	4,780	0,0001
Einbaurichtung*Person	0,0002	2	0,0001	1,291	0,2752
Einbaurichtung*ProbenNr	0,0000	2	0,0000	0,071	0,9318
Person*ProbenNr	0,0018	4	0,0005	6,896	0,0000
Probendicke*Durchmesser*Zuschnittsart	0,0128	18	0,0007	10,782	0,0000
Probendicke*Durchmesser*Einbaurichtung	0,0003	6	0,0001	0,848	0,5330
Probendicke*Durchmesser*Person	0,0070	12	0,0006	8,865	0,0000
Probendicke*Durchmesser*ProbenNr	0,0080	12	0,0007	10,044	0,0000
Probendicke*Zuschnittsart*Einbaurichtung	0,0001	9	0,0000	0,143	0,9984
Probendicke*Zuschnittsart*Person	0,0091	18	0,0005	7,614	0,0000
Probendicke*Zuschnittsart*ProbenNr	0,0136	18	0,0008	11,422	0,0000
Probendicke*Einbaurichtung*Person	0,0001	6	0,0000	0,296	0,9388
Probendicke*Einbaurichtung*ProbenNr	0,0000	6	0,0000	0,117	0,9944
Probendicke*Person*ProbenNr	0,0135	12	0,0011	17,023	0,0000
Durchmesser*Zuschnittsart*Einbaurichtung	0,0002	6	0,0000	0,394	0,8832
Durchmesser*Zuschnittsart*Person	0,0122	12	0,0010	15,418	0,0000
Durchmesser*Zuschnittsart*ProbenNr	0,0102	12	0,0009	12,904	0,0000
Durchmesser*Einbaurichtung*Person	0,0001	4	0,0000	0,376	0,8260
Durchmesser*Einbaurichtung*ProbenNr	0,0000	4	0,0000	0,178	0,9498
Durchmesser*Person*ProbenNr	0,0057	8	0,0007	10,746	0,0000
Zuschnittsart*Einbaurichtung*Person	0,0000	6	0,0000	0,104	0,9960
Zuschnittsart*Einbaurichtung*ProbenNr	0,0001	6	0,0000	0,160	0,9872
Zuschnittsart*Person*ProbenNr	0,0066	12	0,0005	8,257	0,0000
Einbaurichtung*Person*ProbenNr	0,0001	4	0,0000	0,194	0,9416
Error	0,1533	2318	0,0001		
Total	3,4380	2591			

Tabelle C-4: Ergebnis der Berechnung der Varianzanalyse; Versuchsplan 1; Zielgröße Varianz

Source	TSS	d.f.	Mean Sq.	F	Prob>F
Probendicke	0,28	3	0,093	4321,319	0,0000
Durchmesser	0,00	2	0,000	12,315	0,0000
Zuschnittsart	0,00	3	0,000	18,668	0,0000
Einbaurichtung	0,00	1	0,000	8,657	0,0033
Person	0,04	2	0,018	816,179	0,0000
ProbenNr	0,00	2	0,000	0,623	0,5363
Probendicke*Durchmesser	0,00	6	0,000	8,046	0,0000
Probendicke*Zuschnittsart	0,00	9	0,000	4,376	0,0000
Probendicke*Einbaurichtung	0,00	3	0,000	2,454	0,0615
Probendicke*Person	0,04	6	0,006	282,900	0,0000
Probendicke*ProbenNr	0,00	6	0,000	14,975	0,0000
Durchmesser*Zuschnittsart	0,00	6	0,000	8,890	0,0000
Durchmesser*Einbaurichtung	0,00	2	0,000	0,155	0,8561
Durchmesser*Person	0,00	4	0,000	9,616	0,0000
Durchmesser*ProbenNr	0,00	4	0,000	23,061	0,0000
Zuschnittsart*Einbaurichtung	0,00	3	0,000	0,031	0,9928
Zuschnittsart*Person	0,00	6	0,000	6,730	0,0000
Zuschnittsart*ProbenNr	0,00	6	0,000	4,843	0,0001
Einbaurichtung*Person	0,00	2	0,000	1,067	0,3443
Einbaurichtung*ProbenNr	0,00	2	0,000	0,063	0,9393
Person*ProbenNr	0,00	4	0,000	8,828	0,0000
Probendicke*Durchmesser*Zuschnittsart	0,00	18	0,000	8,359	0,0000
Probendicke*Durchmesser*Einbaurichtung	0,00	6	0,000	0,492	0,8147
Probendicke*Durchmesser*Person	0,00	12	0,000	8,686	0,0000
Probendicke*Durchmesser*ProbenNr	0,00	12	0,000	9,543	0,0000
Probendicke*Zuschnittsart*Einbaurichtung	0,00	9	0,000	0,097	0,9997
Probendicke*Zuschnittsart*Person	0,00	18	0,000	9,335	0,0000
Probendicke*Zuschnittsart*ProbenNr	0,00	18	0,000	11,064	0,0000
Probendicke*Einbaurichtung*Person	0,00	6	0,000	0,233	0,9660
Probendicke*Einbaurichtung*ProbenNr	0,00	6	0,000	0,080	0,9981
Probendicke*Person*ProbenNr	0,00	12	0,000	17,372	0,0000
Durchmesser*Zuschnittsart*Einbaurichtung	0,00	6	0,000	0,344	0,9139
Durchmesser*Zuschnittsart*Person	0,00	12	0,000	15,988	0,0000
Durchmesser*Zuschnittsart*ProbenNr	0,00	12	0,000	14,718	0,0000
Durchmesser*Einbaurichtung*Person	0,00	4	0,000	0,224	0,9249
Durchmesser*Einbaurichtung*ProbenNr	0,00	4	0,000	0,252	0,9085
Durchmesser*Person*ProbenNr	0,00	8	0,000	10,458	0,0000
Zuschnittsart*Einbaurichtung*Person	0,00	6	0,000	0,062	0,9991
Zuschnittsart*Einbaurichtung*ProbenNr	0,00	6	0,000	0,079	0,9981
Zuschnittsart*Person*ProbenNr	0,00	12	0,000	9,732	0,0000
Einbaurichtung*Person*ProbenNr	0,00	4	0,000	0,142	0,9666
Error	0,05	2318	0,000		
Total	0,45	2591			

Tabelle C-5: Ergebnis der Berechnung der Varianzanalyse; Versuchsplan 1; Zielgröße Schiefe

Source	TSS	d.f.	Mean Sq.	F	Prob>F
Probendicke	1477,12	3	492,374	133408,887	0,0000
Durchmesser	0,75	2	0,377	102,260	0,0000
Zuschnittsart	0,25	3	0,083	22,403	0,0000
Einbaurichtung	0,02	1	0,025	6,708	0,0097
Person	0,52	2	0,261	70,780	0,0000
ProbenNr	0,01	2	0,007	1,951	0,1423
Probendicke*Durchmesser	0,18	6	0,030	8,042	0,0000
Probendicke*Zuschnittsart	1,14	9	0,127	34,339	0,0000
Probendicke*Einbaurichtung	0,12	3	0,040	10,859	0,0000
Probendicke*Person	13,84	6	2,307	625,187	0,0000
Probendicke*ProbenNr	0,24	6	0,040	10,791	0,0000
Durchmesser*Zuschnittsart	0,43	6	0,071	19,256	0,0000
Durchmesser*Einbaurichtung	0,03	2	0,016	4,227	0,0147
Durchmesser*Person	0,25	4	0,061	16,625	0,0000
Durchmesser*ProbenNr	0,07	4	0,017	4,727	0,0008
Zuschnittsart*Einbaurichtung	0,01	3	0,003	0,713	0,5443
Zuschnittsart*Person	0,79	6	0,131	35,512	0,0000
Zuschnittsart*ProbenNr	0,19	6	0,032	8,580	0,0000
Einbaurichtung*Person	0,00	2	0,000	0,016	0,9839
Einbaurichtung*ProbenNr	0,00	2	0,001	0,287	0,7508
Person*ProbenNr	0,09	4	0,023	6,243	0,0001
Probendicke*Durchmesser*Zuschnittsart	0,88	18	0,049	13,311	0,0000
Probendicke*Durchmesser*Einbaurichtung	0,02	6	0,004	1,124	0,3458
Probendicke*Durchmesser*Person	0,35	12	0,029	7,836	0,0000
Probendicke*Durchmesser*ProbenNr	0,20	12	0,016	4,460	0,0000
Probendicke*Zuschnittsart*Einbaurichtung	0,01	9	0,002	0,432	0,9187
Probendicke*Zuschnittsart*Person	2,26	18	0,125	34,001	0,0000
Probendicke*Zuschnittsart*ProbenNr	0,67	18	0,037	10,101	0,0000
Probendicke*Einbaurichtung*Person	0,05	6	0,008	2,268	0,0347
Probendicke*Einbaurichtung*ProbenNr	0,00	6	0,000	0,122	0,9937
Probendicke*Person*ProbenNr	0,39	12	0,033	8,890	0,0000
Durchmesser*Zuschnittsart*Einbaurichtung	0,01	6	0,002	0,510	0,8009
Durchmesser*Zuschnittsart*Person	0,58	12	0,048	13,001	0,0000
Durchmesser*Zuschnittsart*ProbenNr	0,53	12	0,044	11,921	0,0000
Durchmesser*Einbaurichtung*Person	0,02	4	0,005	1,409	0,2285
Durchmesser*Einbaurichtung*ProbenNr	0,00	4	0,000	0,025	0,9988
Durchmesser*Person*ProbenNr	0,13	8	0,016	4,251	0,0000
Zuschnittsart*Einbaurichtung*Person	0,00	6	0,001	0,222	0,9698
Zuschnittsart*Einbaurichtung*ProbenNr	0,01	6	0,001	0,262	0,9544
Zuschnittsart*Person*ProbenNr	0,39	12	0,033	8,847	0,0000
Einbaurichtung*Person*ProbenNr	0,00	4	0,001	0,268	0,8989
Error	8,56	2318	0,004		
Total	1511,13	2591			

Tabelle C-6: Ergebnis der Berechnung der Varianzanalyse; Versuchsplan 1; Zielgröße Wölbung

Source	TSS	d.f.	Mean Sq.	F	Prob>F
Probendicke	12315,21	3	4105,068	124326,680	0,0
Durchmesser	9,26	2	4,632	140,272	0,0
Zuschnittsart	2,26	3	0,752	22,767	0,0
Einbaurichtung	0,00	1	0,000	0,004	0,9
Person	215,52	2	107,759	3263,596	0,0
ProbenNr	0,04	2	0,021	0,632	0,5
Probendicke*Durchmesser	17,46	6	2,910	88,129	0,0
Probendicke*Zuschnittsart	5,59	9	0,621	18,819	0,0
Probendicke*Einbaurichtung	1,32	3	0,439	13,292	0,0
Probendicke*Person	493,74	6	82,290	2492,252	0,0
Probendicke*ProbenNr	3,72	6	0,620	18,782	0,0
Durchmesser*Zuschnittsart	2,42	6	0,403	12,201	0,0
Durchmesser*Einbaurichtung	0,43	2	0,217	6,574	0,0
Durchmesser*Person	3,26	4	0,816	24,704	0,0
Durchmesser*ProbenNr	1,13	4	0,284	8,593	0,0
Zuschnittsart*Einbaurichtung	0,08	3	0,027	0,829	0,5
Zuschnittsart*Person	3,48	6	0,580	17,576	0,0
Zuschnittsart*ProbenNr	1,54	6	0,257	7,792	0,0
Einbaurichtung*Person	0,09	2	0,044	1,332	0,3
Einbaurichtung*ProbenNr	0,03	2	0,017	0,507	0,6
Person*ProbenNr	0,67	4	0,167	5,045	0,0
Probendicke*Durchmesser*Zuschnittsart	6,01	18	0,334	10,113	0,0
Probendicke*Durchmesser*Einbaurichtung	1,10	6	0,183	5,533	0,0
Probendicke*Durchmesser*Person	9,01	12	0,751	22,739	0,0
Probendicke*Durchmesser*ProbenNr	3,28	12	0,274	8,286	0,0
Probendicke*Zuschnittsart*Einbaurichtung	0,28	9	0,031	0,929	0,5
Probendicke*Zuschnittsart*Person	5,55	18	0,308	9,337	0,0
Probendicke*Zuschnittsart*ProbenNr	7,95	18	0,441	13,370	0,0
Probendicke*Einbaurichtung*Person	0,80	6	0,133	4,014	0,0
Probendicke*Einbaurichtung*ProbenNr	0,07	6	0,012	0,372	0,9
Probendicke*Person*ProbenNr	2,38	12	0,198	6,002	0,0
Durchmesser*Zuschnittsart*Einbaurichtung	0,22	6	0,037	1,110	0,4
Durchmesser*Zuschnittsart*Person	6,30	12	0,525	15,897	0,0
Durchmesser*Zuschnittsart*ProbenNr	3,61	12	0,301	9,108	0,0
Durchmesser*Einbaurichtung*Person	0,32	4	0,081	2,449	0,0
Durchmesser*Einbaurichtung*ProbenNr	0,01	4	0,003	0,100	1,0
Durchmesser*Person*ProbenNr	0,86	8	0,108	3,257	0,0
Zuschnittsart*Einbaurichtung*Person	0,12	6	0,020	0,600	0,7
Zuschnittsart*Einbaurichtung*ProbenNr	0,07	6	0,012	0,372	0,9
Zuschnittsart*Person*ProbenNr	2,42	12	0,201	6,102	0,0
Einbaurichtung*Person*ProbenNr	0,05	4	0,012	0,353	0,8
Error	76,54	2318	0,033		
Total	13204,19	2591			

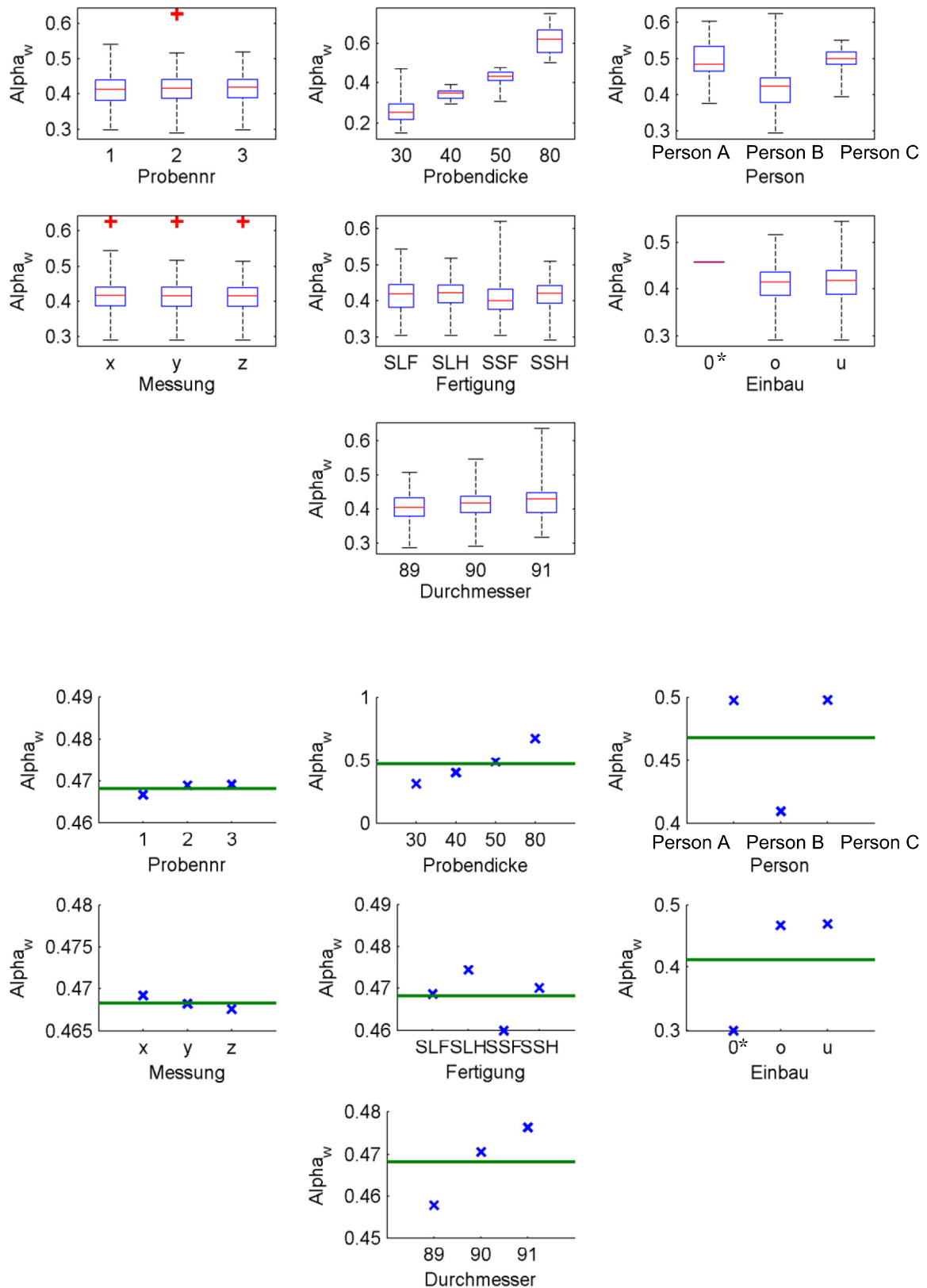


Abbildung C-4: Darstellung von Effekten zur Prüfung der praktischen Signifikanz eines Effekts; Versuchsplan 1 (Sägezuschnitte); Zielgröße α_w ; oben: Boxplots; unten Effektplots

* Eine Probe wurde versehentlich falsch benannt. Der Effekt ist daher vernachlässigbar.

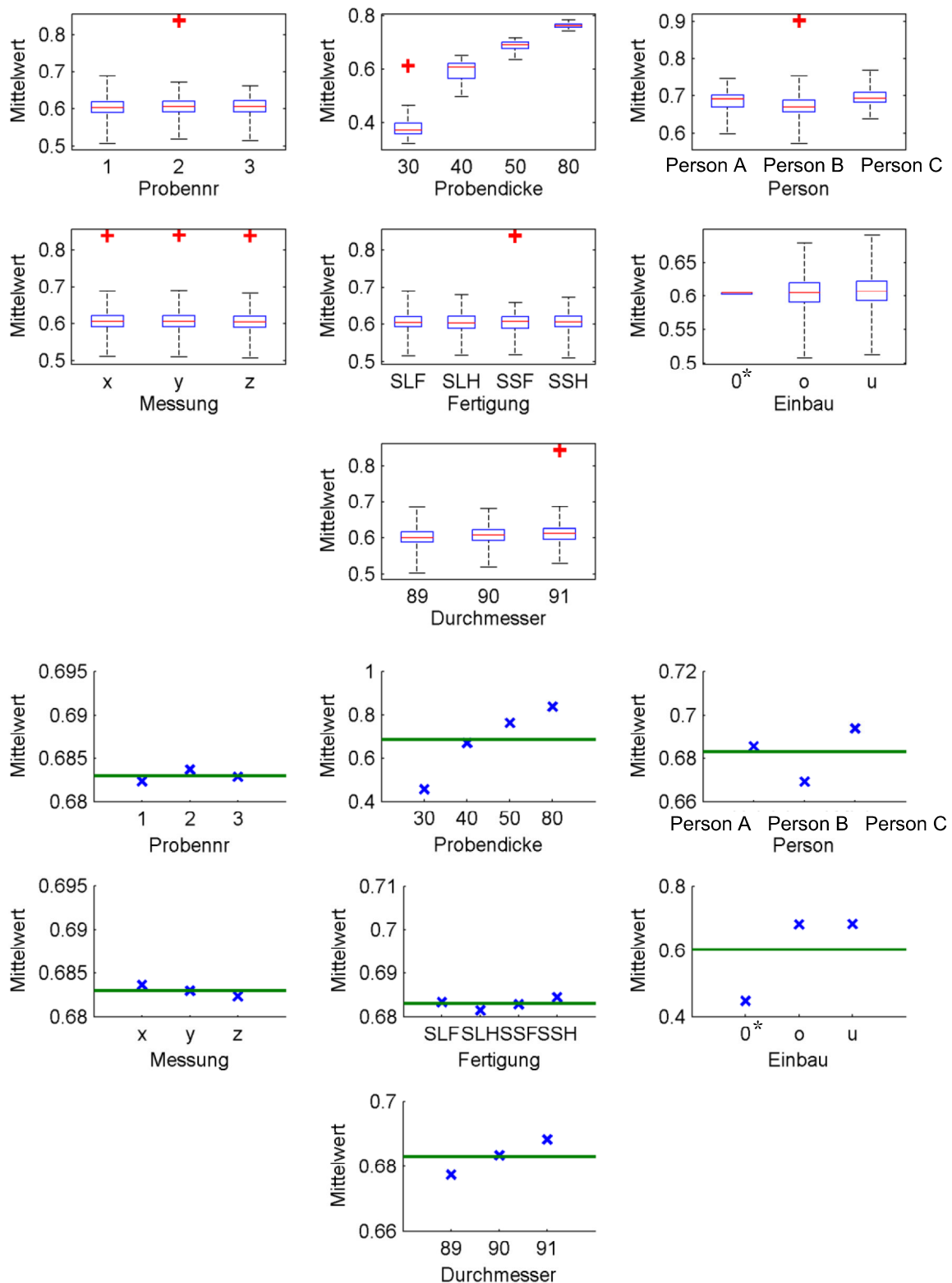


Abbildung C-5: Darstellung von Effekten zur Prüfung der praktischen Signifikanz eines Effekts; Versuchsplan 1 (Sägezuschnitte); Zielgröße Mittelwert; oben: Boxplots; unten Effektplots

* Eine Probe wurde versehentlich falsch benannt. Der Effekt ist daher vernachlässigbar.

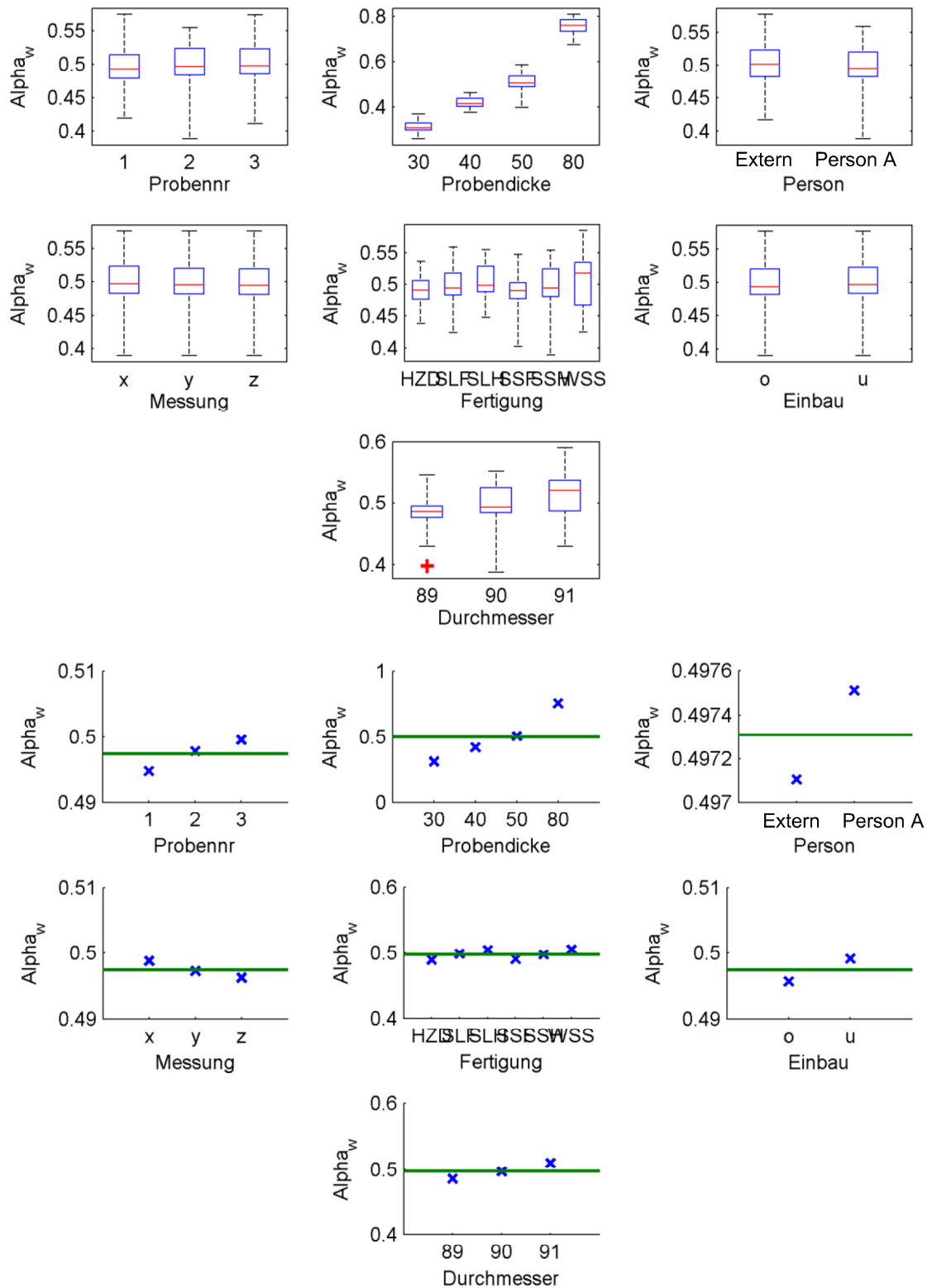


Abbildung C-6: Darstellung von Effekten zur Prüfung der praktischen Signifikanz eines Effekts; Versuchsplan 2 (Sägezuschnitte, WSS, HZD); Zielgröße α_w ; oben: Boxplots; unten Effektplots

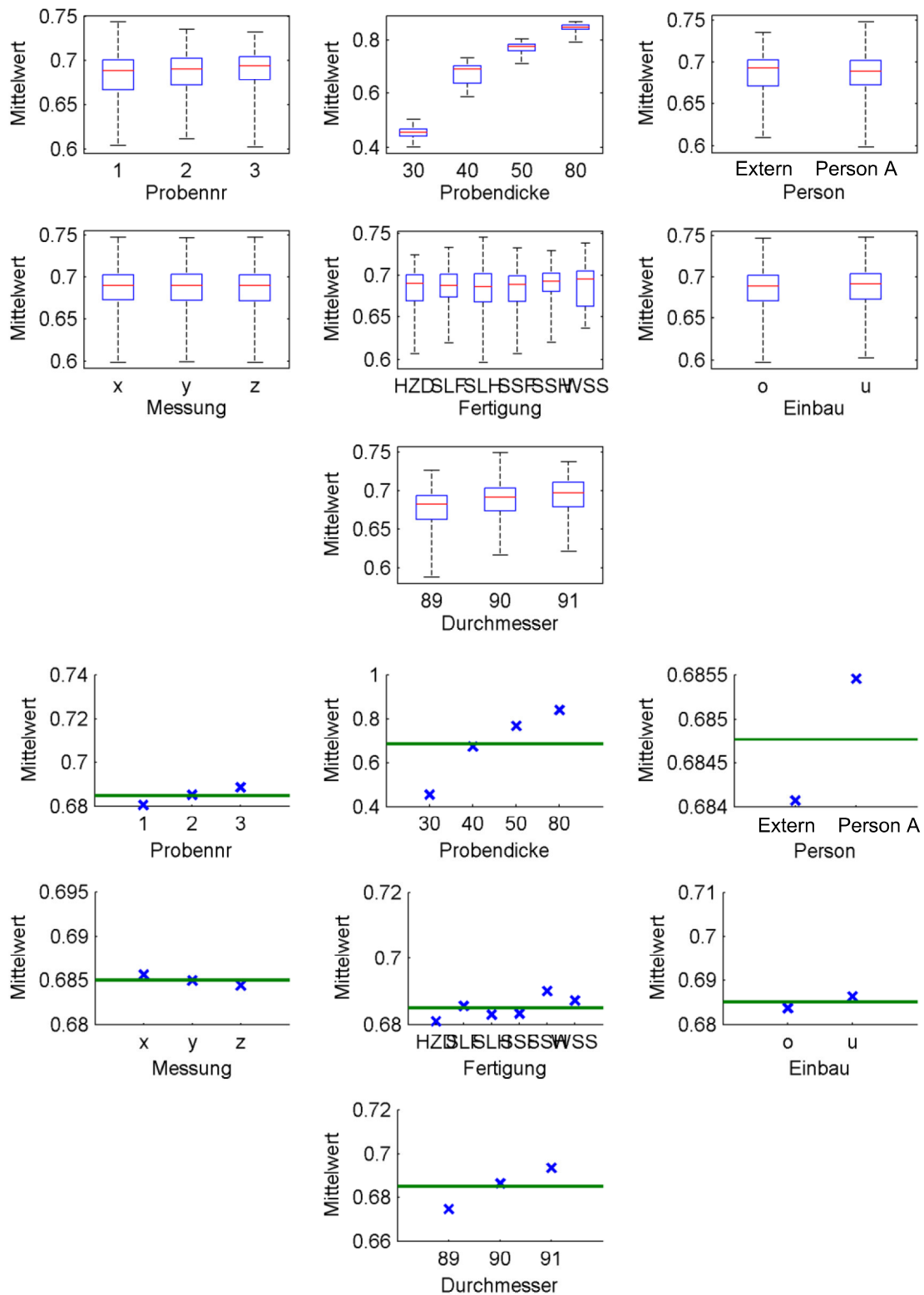


Abbildung C-7: Darstellung von Effekten zur Prüfung der praktischen Signifikanz eines Effekts; Versuchsplan 2 (Sägezuschnitte, WSS, HZD); Zielgröße Mittelwert; oben: Boxplots; unten Effektplots

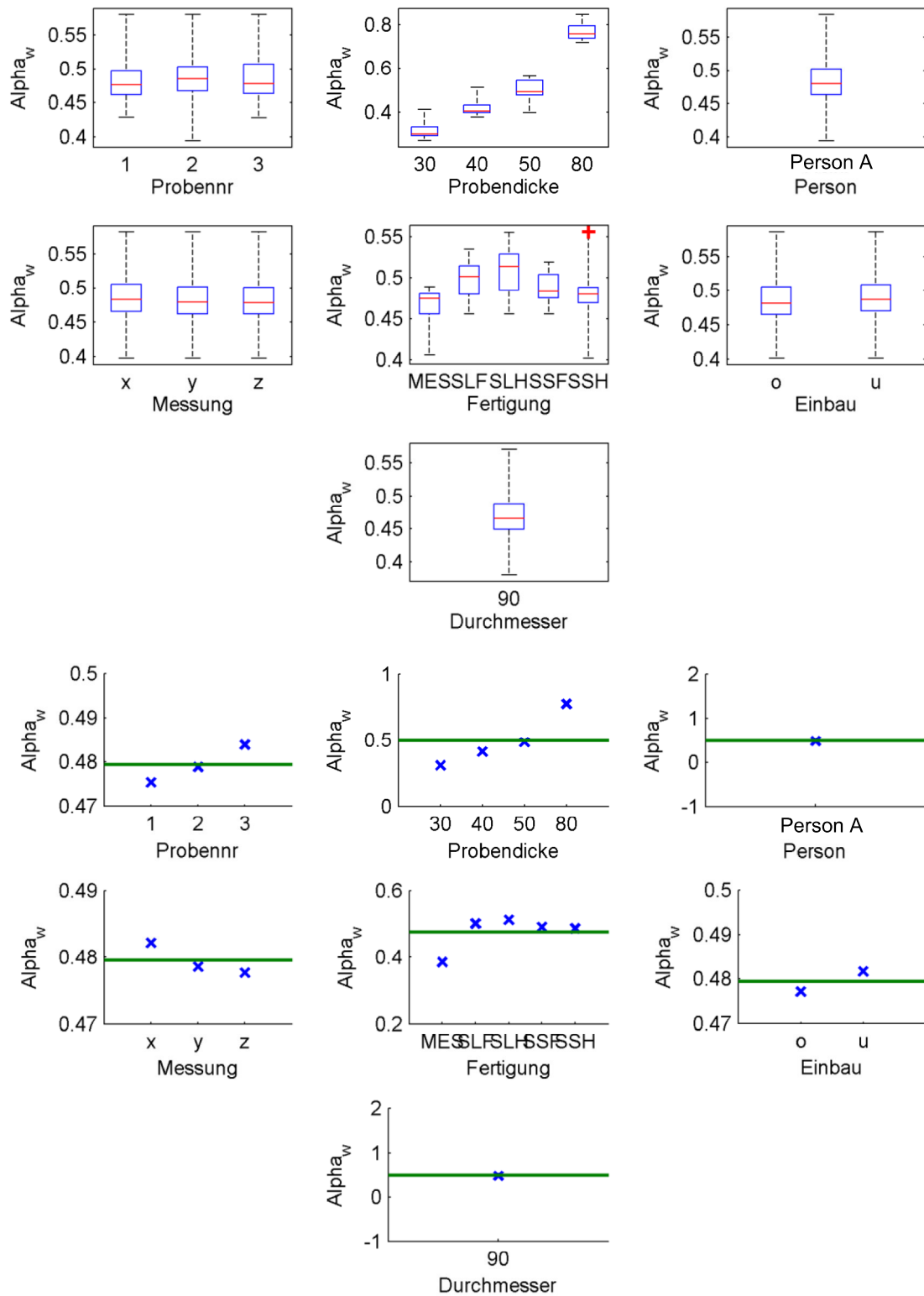


Abbildung C-8: Darstellung von Effekten zur Prüfung der praktischen Signifikanz eines Effekts; Versuchsplan 3 (Sägezuschnitte, MES, Probendurchmesser 90 mm); Zielgröße α_w ; oben: Boxplots; unten Effektplots

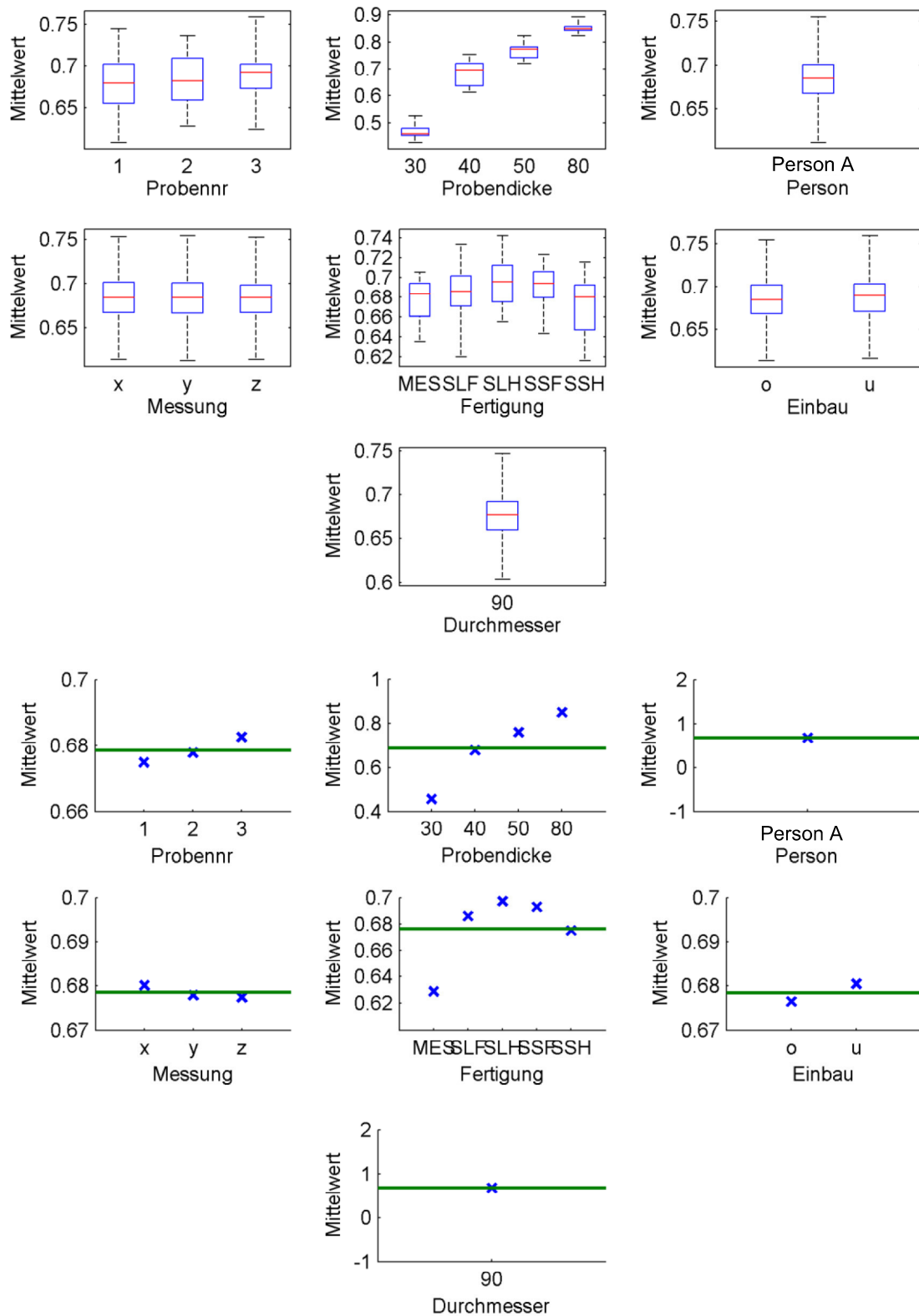


Abbildung C-9: Darstellung von Effekten zur Prüfung der praktischen Signifikanz eines Effekts; Versuchsplan 3 (Sägezuschnitte, MES, Probendurchmesser 90 mm); Zielgröße Mittelwert; oben: Boxplots; unten Effektplots

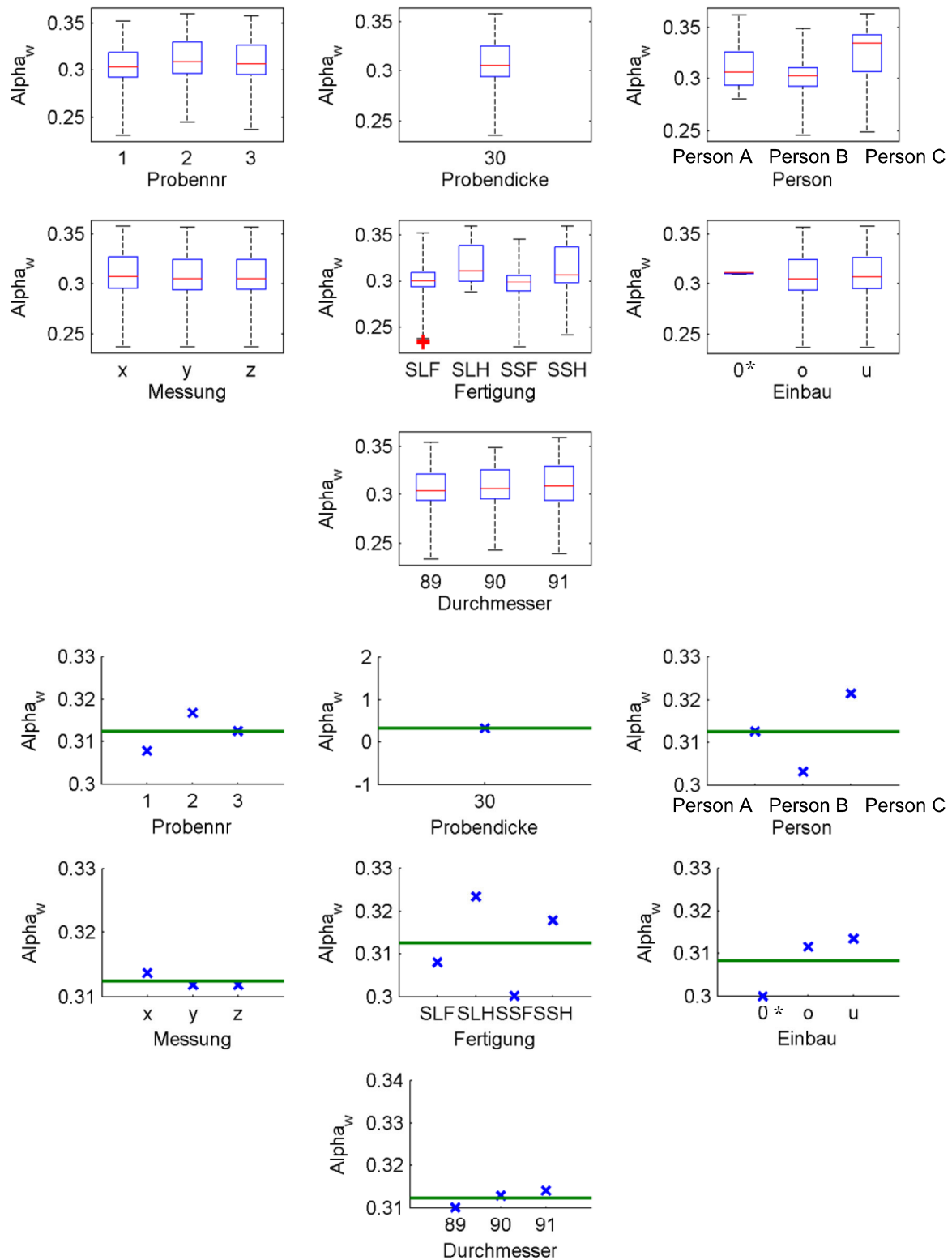


Abbildung C-10: Darstellung von Effekten zur Prüfung der praktischen Signifikanz eines Effekts; Versuchsplan 4 (Sägezuschnitte, Probendicke 30 mm); Zielgröße α_w ; oben: Boxplots; unten Effektplots

* Eine Probe wurde versehentlich falsch benannt. Der Effekt ist daher vernachlässigbar.

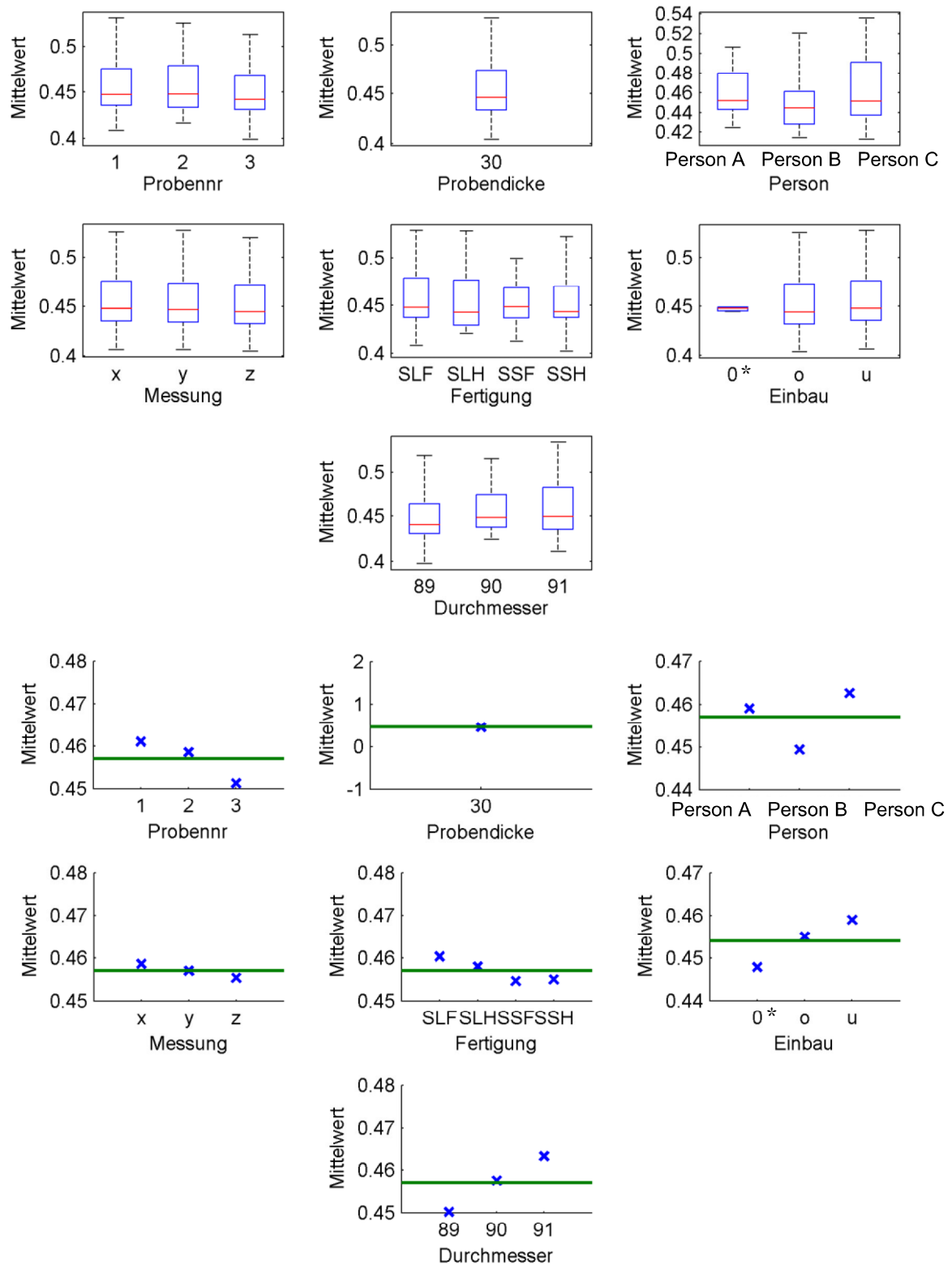


Abbildung C-11: Darstellung von Effekten zur Prüfung der praktischen Signifikanz eines Effekts; Versuchsplan 4 (Sägezuschnitte, Probendicke 30 mm); Zielgröße Mittelwert; oben: Boxplots; unten Effektplots

* Eine Probe wurde versehentlich falsch benannt. Der Effekt ist daher vernachlässigbar.

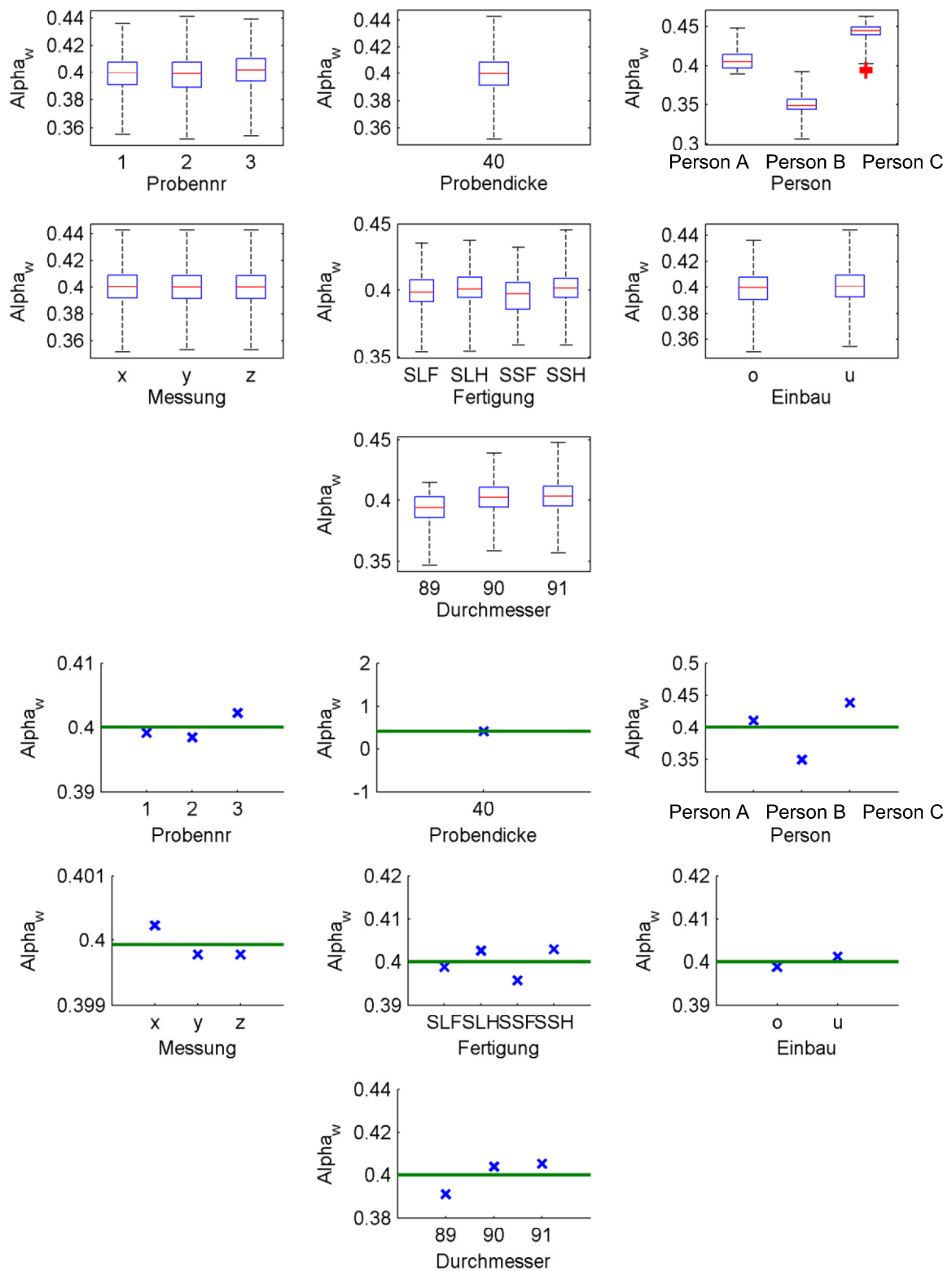


Abbildung C-12: Darstellung von Effekten zur Prüfung der praktischen Signifikanz eines Effekts; Versuchsplan 5 (Sägezuschnitte, Probendicke 40 mm); Zielgröße α_w ; oben: Boxplots; unten Effektplots

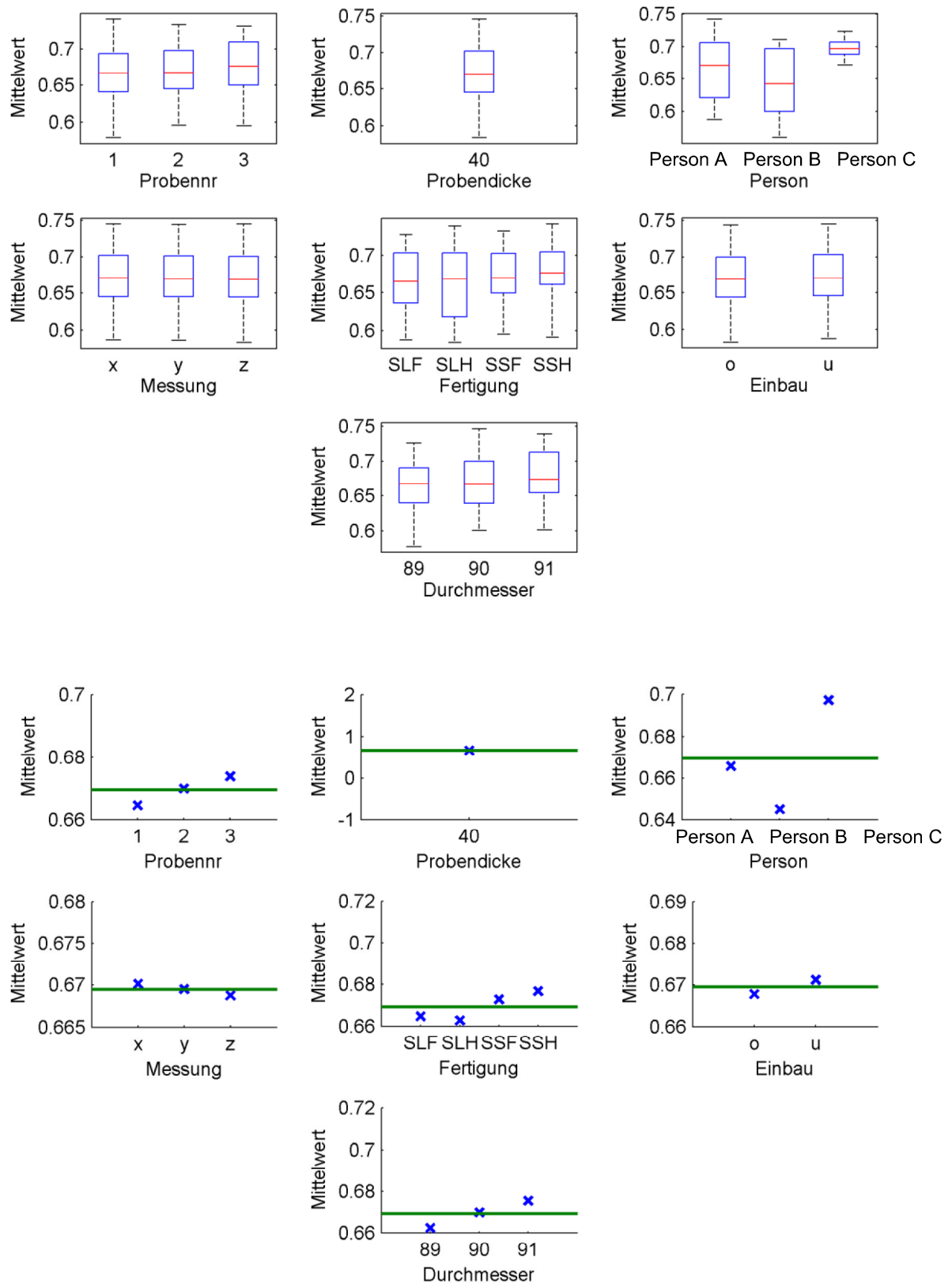


Abbildung C-13: Darstellung von Effekten zur Prüfung der praktischen Signifikanz eines Effekts; Versuchsplan 5 (Sägezuschnitte, Probendicke 40 mm); Zielgröße Mittelwert; oben: Boxplots; unten Effektplots

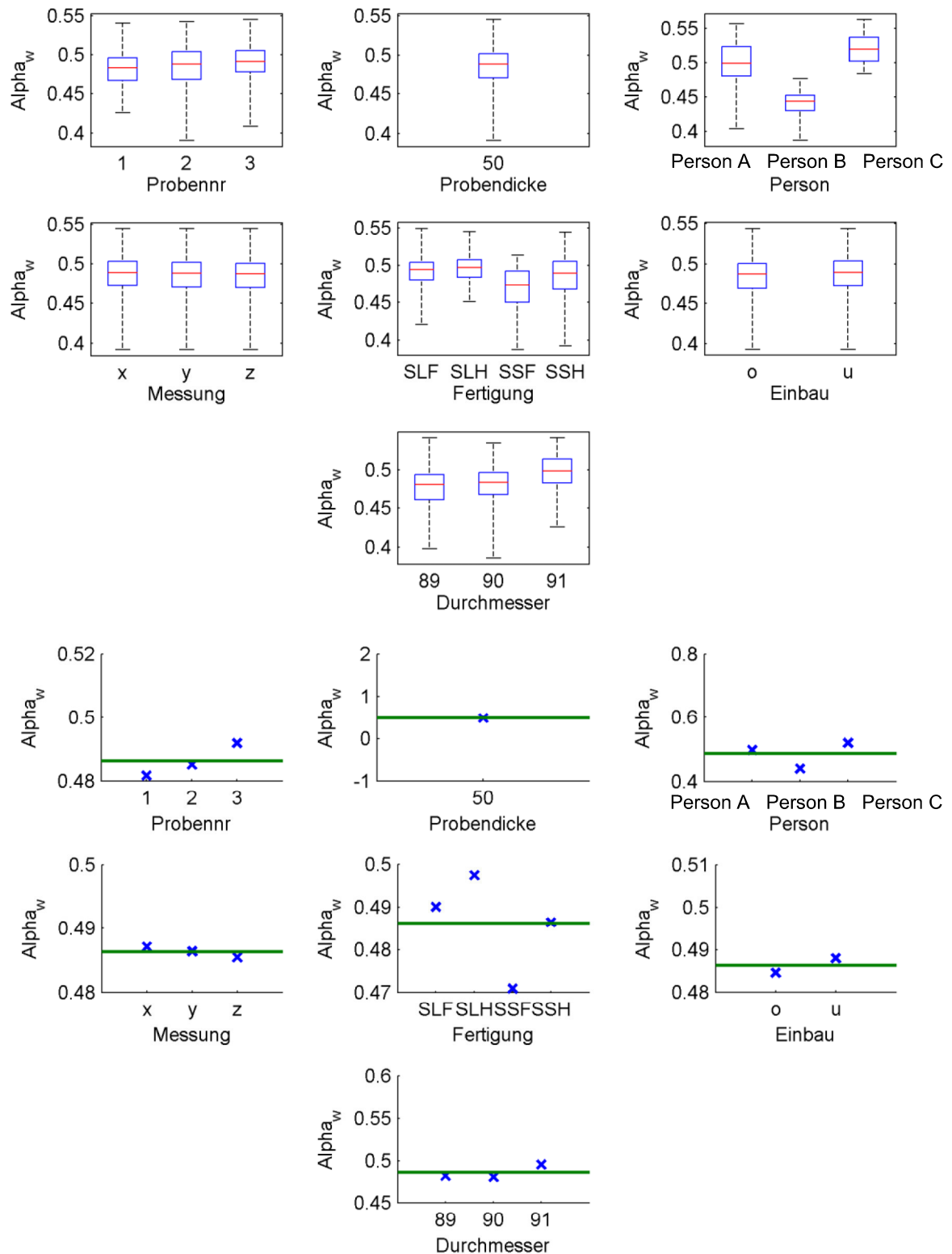


Abbildung C-14: Darstellung von Effekten zur Prüfung der praktischen Signifikanz eines Effekts; Versuchsplan 6 (Sägezuschnitte, Probendicke 50 mm); Zielgröße α_w ; oben: Boxplots; unten Effektplots

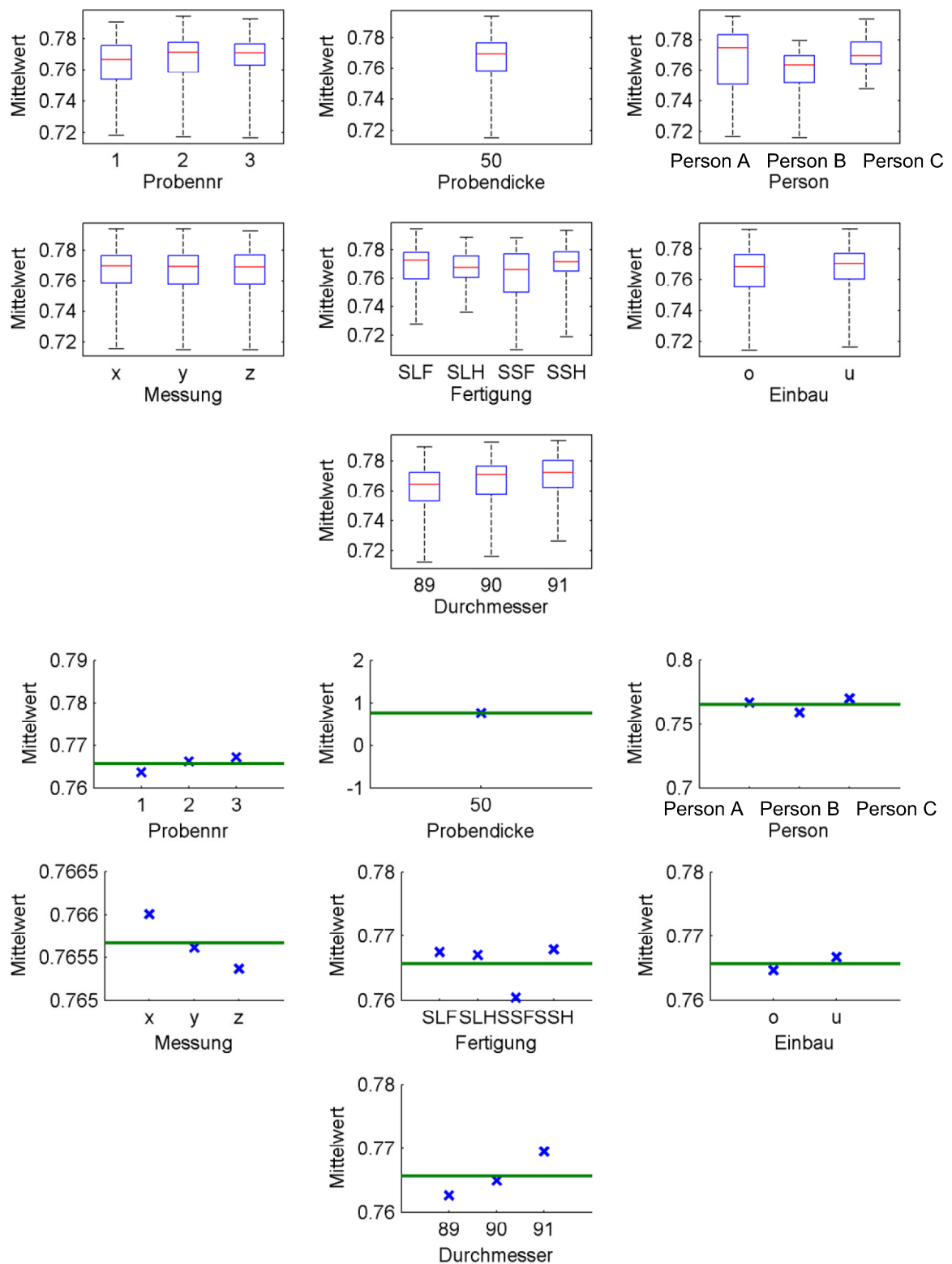


Abbildung C-15: Darstellung von Effekten zur Prüfung der praktischen Signifikanz eines Effekts; Versuchsplan 6 (Sägezuschnitte, Probendicke 50 mm); Zielgröße Mittelwert; oben: Boxplots; unten Effektplots

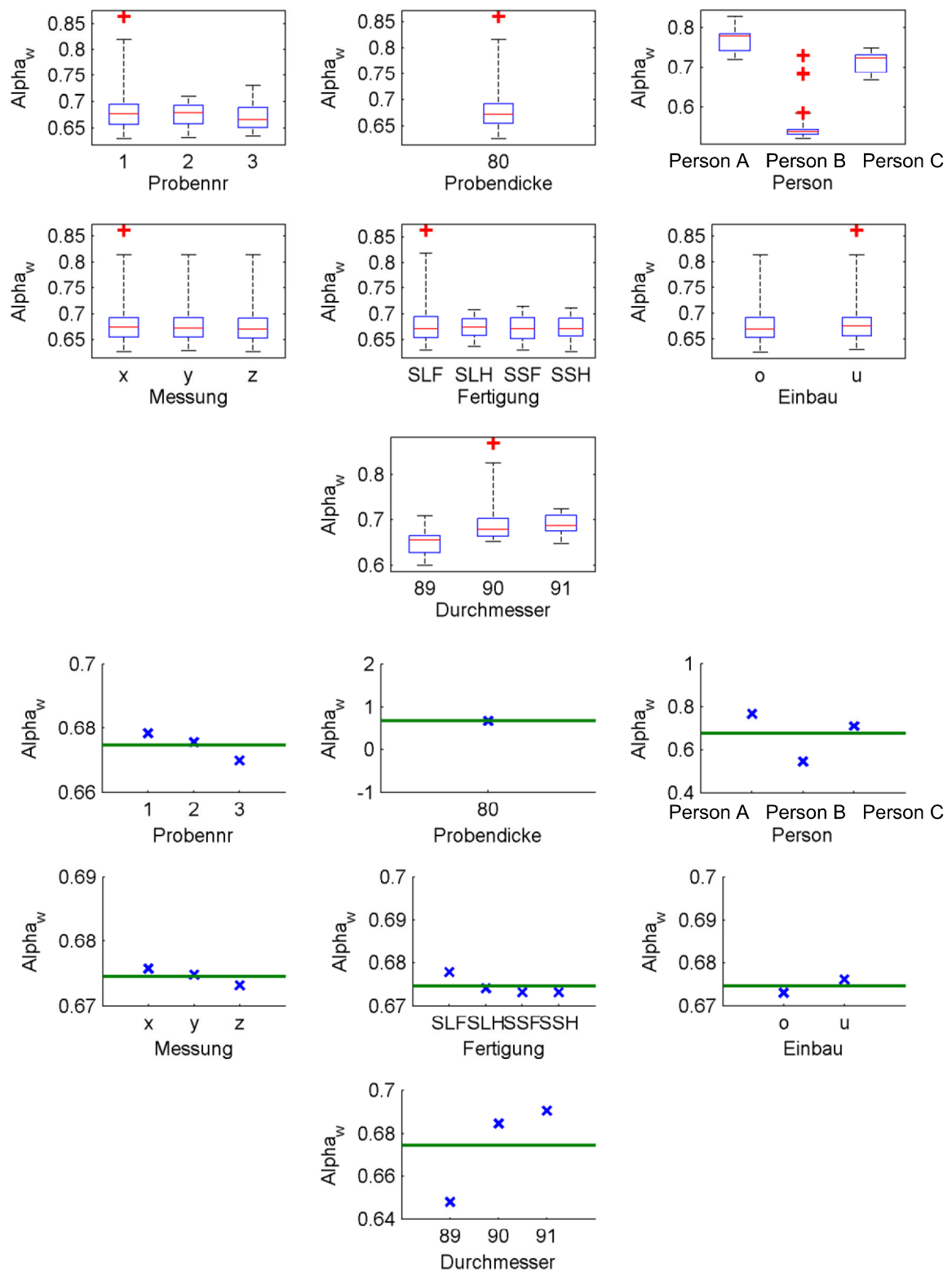


Abbildung C-16: Darstellung von Effekten zur Prüfung der praktischen Signifikanz eines Effekts; Versuchsplan 7 (Sägezuschnitte, Probendicke 80 mm); Zielgröße α_w ; oben: Boxplots; unten Effektplots

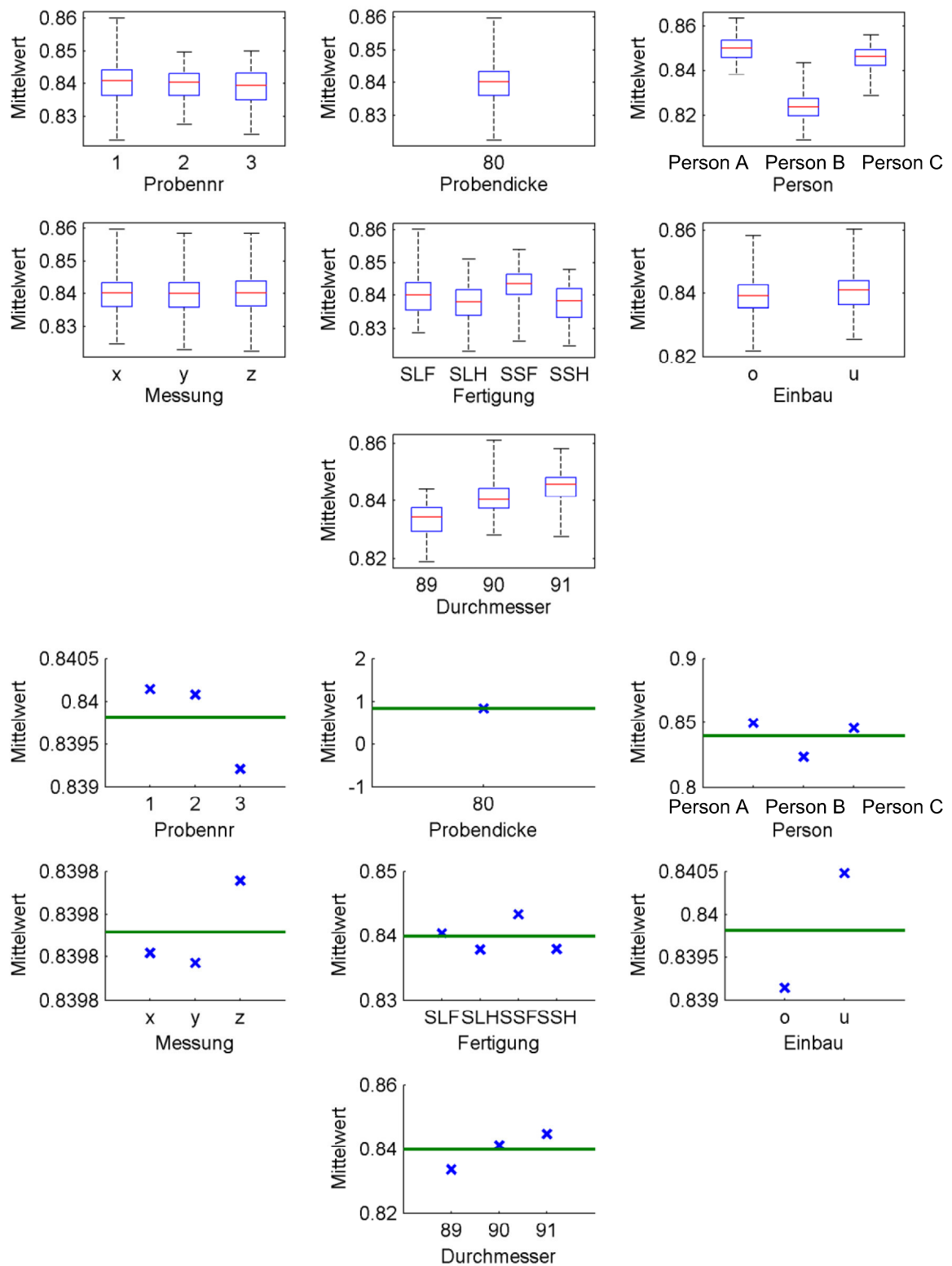


Abbildung C-17: Darstellung von Effekten zur Prüfung der praktischen Signifikanz eines Effekts; Versuchsplan 7 (Sägezuschnitte, Probendicke 80 mm); Zielgröße Mittelwert; oben: Boxplots; unten Effektplots

D Schallabsorber in der Bauakustik

In klassischen Schallabsorbern, wie sie in der Bauakustik verwendet werden, wird schallabsorbierendes Material mit einem dahinterliegenden Hohlraum kombiniert. Dadurch werden Effekte genutzt, wie in Abbildung 15 auf Seite 51 beispielhaft gezeigt. Ein prominentes Beispiel für einen Hohlraumabsorber, ein sogenannter Resonanzabsorber, ist der Helmholtzabsorber. FUCHS und ZHA [114] entwickelten 1995 den mikroperforierten Absorber, mit dem es seitdem möglich ist, das Feder-Masse-System als transparente Loch- oder Schlitzplattenabsorber oder Folien auszuführen. Die Luftmasse in den Bohrungen in der Abdeckung oder in den Löchern in der Absorberfolie stellt dabei die Feder dar, und das eingeschlossene Luftvolumen im Inneren des Absorbers bildet die Masse. Unabhängig davon, ob die Impedanz durch ein poröses Material oder durch ein Federmassensystem realisiert wird, kann der Schallabsorptionsgrad α aus dem Reflexionsfaktor r wie folgt berechnet werden (siehe auch Gleichung (2.6)):

$$r = \frac{Z - \rho c_0}{Z + \rho c_0} = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0}$$

Dabei stellt Z die Eingangsimpedanz des Absorbers dar, Z_0 die Impedanz der Luft mit $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ und $c = 343 \text{ m/s}$. Die Absorption wird am größten, wenn die Schallkennimpedanz der Luft angepasst ist: $Z \cong \rho c_0$, somit $r \cong 0$.

D-1 Plattenresonatoren und Lochplattenresonatoren

FUCHS [115] setzt sich intensiv mit der Theorie und Auslegung von Schalldämpfern und Schallabsorbern auseinander. Sowohl die Plattenresonatoren als auch die Lochplattenresonatoren sind Feder-Masse-Systeme, bei denen die schwingende Platte als Masse und der eingeschlossene Luftraum hinter der Platte als Feder wirken. Der auftreffenden Schallwelle wirkt demnach die Gesamtimpedanz Z entgegen, die sich aus der Plattenimpedanz Z_p (Impedanzen der Eigenschwingung der Platte) und der Transferimpedanz Z_T (Wirkung des schallhart abgeschlossenen Luftvolumens) zusammensetzt [115, 116].

$$Z = Z_p + Z_T$$

$$Z_p = \frac{1}{\sum_m \sum_n \frac{1}{Z_{mn}}} \quad \text{mit } m, n = 1, 3, 5, \dots [117]$$

$$Z_T = -j\rho_0 c \cdot \cot\left(\frac{\omega D}{c_0}\right)$$

Jede Resonanzfrequenz der Platte verfügt über eine eigene Impedanz Z_{mn} , die sich entsprechend der folgenden Gleichung berechnen lässt:

$$Z_{mn} = \frac{B' B_{mn} g_{mn}}{\omega \cdot a^4} + j \left[\omega \cdot m'' A_{mn} - \frac{B' B_{mn}}{\omega \cdot a^4} \right]$$

$$\text{mit} \quad B' = \frac{E \cdot h^3}{12(1 - \mu_p^2)}$$

$$\text{und} \quad A_{mn} = m^2 n^2 \pi^4 \frac{1}{64}, \quad B_{mn} = (m^2 + n^2)^2 \pi^4 A_{mn}$$

Die Konstanten A_{mn}, B_{mn} sind von der Platteneinspannung abhängig. Weitere Parameter sind die Biegesteifigkeit der Platte B' , der Verlustfaktor der Moden (m, n) g_{mn} , die flächenbezogene Masse der Platte m'' , die Plattendicke h , die Poissonsche Querkontraktionszahl μ_p und der Elastizitätsmodul des Plattenmaterials E .

Die Berechnung der Impedanz der Lochplattenabsorbers erfolgt analog. Zusätzlich muss noch die Impedanz der Luft in den Löchern berechnet werden. Ausführliche Berechnungsgleichungen finden sich in [116, 118].

D-2 Theorie vom homogenen Medium

Die Theorie des homogenen Mediums ist die älteste Theorie zur Beschreibung von porösen Schallabsorbern [3, 29]. Der Aufbau eines Modells zur Theorie des homogenen Mediums erfolgt analog zur elektrotechnischen Beschreibung verlustbehafteter elektrischer Leitungen. Unter Annahme einer starren Matrix und der für eine Homogenisierung erforderlichen Größenskalen ist es möglich, die Ausbreitungskonstante Γ_a und den Wellenwiderstand Z_a zu beschreiben. Die Theorie des homogenen Mediums geht dabei nicht auf alle Wechselwirkungsmechanismen ein: Eine Einschränkung ist beispielsweise die Annahme der starren Matrix. Ferner handelt es sich nicht um eine einzelne Theorie, da je nach Konstruktion mehr oder weniger Faktoren berücksichtigt werden können. Der Übergang zu anderen analytischen Theorien ist fließend. Das Modell des homogenen Mediums lässt sich mithilfe von drei Eingangsparametern erstellen: Porosität, Strukturfaktor und Strömungsresistanz.

$$\Gamma_a = k_0 * i \sqrt{\kappa_{eff} \chi \left(1 - \frac{i}{\Omega}\right)} \quad \text{und}$$

$$Z_a = Z_0 \frac{1}{\phi} \sqrt{\frac{\chi}{\kappa_{eff}} \left(1 - \frac{i}{\Omega}\right)}.$$

$$\kappa_{eff} = 1 + \frac{\kappa - 1}{1 + i\omega\tau}$$

$$\Omega = \frac{\chi\omega\rho_0}{\phi\Xi}$$

Dabei beschreibt κ_{eff} die Wärmeleitung, Ω die Frequenzvariable, Ξ die Strömungsresistanz, χ den Strukturfaktor und ϕ die Porosität. Für den Absorptionsgrad ergibt sich aus $k_a = \Gamma/i$ und $Z_s = -iZ_a \arctan(k_a h)$ für senkrechten Schalleinfall folgende Gleichung:

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z_s - Z_0}{Z_s + Z_0} \right|^2$$

D-3 Empirische Modelle

Delany-Bazley-Modell (für Faserstoffe)

Das einfachste Modell zur Bestimmung der Schallabsorption geht auf DELANY und BAZLEY [32] zurück. Die beiden haben aufgrund von Experimenten an Faserstoffen mit einer Porosität nahe 1,00 ein Potenzgesetz entwickelt. Für die charakteristische Impedanz Z_c und die komplexe Wellenzahl k wurden in Abhängigkeit von der Strömungsresistanz Ξ folgende Gleichungen entwickelt. Die Materialeigenschaften der Luft-Dichte ρ_0 und Luft-Schallgeschwindigkeit c_0 werden als bekannt und gleichzeitig konstant vorausgesetzt. Die Strömungsresistanz ist hierbei der einzige Eingangsparameter. Die Impedanz des Materials wird nach DELANY und BAZLEY mit Z_{DB} angegeben.

$$Z_c = \rho_0 c_0 \left[1 + 9,08 \left(10^3 \frac{f}{\Xi} \right)^{-0,75} - i 11,9 \left(10^3 \frac{f}{\Xi} \right)^{-0,73} \right]$$

$$k_{DB} = \frac{\omega}{c_0} \left[1 + 10,8 \left(10^3 \frac{f}{\Xi} \right)^{-0,70} - i 10,3 \left(10^3 \frac{f}{\Xi} \right)^{-0,59} \right]$$

$$Z_{DB} = -i \frac{Z_c}{\tan(k_{DB} \cdot h)}$$

Delany-Bazley-Miki-Modell (nur für Fasermaterialien)

MIKI [33] bemerkt, dass es bei DELANY und BAZLEY im tieffrequenten Bereich zu negativen Werten des Realteils der Oberflächen-Impedanz kommen kann. Aus diesem Grund entwickelt MIKI ein Modell, das analoge Eingangsparameter wie das von DELANY und BAZLEY verwendet. Weiterhin kommt MIKI durch eine verbesserte Regressionsanalyse zu etwas anderen Konstanten. Die Berechnung der Impedanz des Materials erfolgt analog zum Delany-Bazley-Modell.

$$Z_c = \rho_0 c_0 \left[1 + 5,50 \left(10^3 \frac{f}{\Xi} \right)^{-0,632} - i 8,43 \left(10^3 \frac{f}{\Xi} \right)^{-0,632} \right]$$
$$k = \frac{\omega}{c_0} \left[1 + 7,81 \left(10^3 \frac{f}{\Xi} \right)^{-0,618} - i 11,41 \left(10^3 \frac{f}{\Xi} \right)^{-0,618} \right]$$

Dunn-Davern-Modell

DUNN und DAVERN [77] nutzen das für Fasermaterialien gültige DELANY-Modell, um es durch die Verwendung anderer Konstanten für die Berechnung von Schaumstoffen einzusetzen. Die Koeffizienten finden sich in [77].

D-4 Phänomenologische Modelle

Dem Johnson-Champoux-Allard-Pride-Lafarge (JCAPL)-Modell werden weitere Parameter hinzugefügt: Die statisch-viskose Tortuosität α_0 [37] bei der Berechnung der komplexen Dichte und die thermisch-statische Tortuosität α_0' bei der Berechnung des Kompressionsmoduls. Die komplexe Dichte $\tilde{\rho}(\omega) = \frac{\rho_0 \tilde{\alpha}(\omega)}{\phi}$ enthält nun die Variable $\tilde{\alpha}(\omega)$, die sich wie folgt zusammensetzt:

$$\tilde{\alpha}(\omega) = \alpha_\infty \left[1 + \frac{\tilde{F}(\omega)}{i\bar{\omega}} \right]$$

$$\text{mit } \tilde{F}(\omega) = 1 - P + P \sqrt{1 + \frac{M}{2P^2} i\bar{\omega}}$$

$$\bar{\omega} = \frac{\omega \rho_0 k_0 \alpha_\infty}{\eta \phi}$$

$$M = \frac{8 k_0 \alpha_\infty}{\phi \Lambda^2}$$

$$P = \frac{M}{4 \left(\frac{\alpha_0}{\alpha_\infty} - 1 \right)}$$

Für die Berechnung des Kompressionsmoduls $\tilde{K}(\omega)$ wird zusätzlich die thermisch-statistische Tortuosität α_0' betrachtet:

$$\tilde{K}(\omega) = \frac{\kappa P_0}{\phi} \frac{1}{\tilde{\beta}(\omega)}$$

$$\tilde{\beta}(\omega) = \kappa - (\kappa - 1) \left[1 + \frac{\tilde{F}'(\omega)}{i\bar{\omega}'} \right]^{-1}$$

$$\tilde{F}'(\omega) = 1 - P' + P' \sqrt{1 + \frac{M'}{2P'^2} i\bar{\omega}'}$$

$$\bar{\omega}' = \frac{\omega \rho_0 k_0' Pr}{\eta \phi}$$

$$M' = \frac{8k_0'}{\phi \Lambda'^2}$$

$$P' = \frac{M'}{4(\alpha_0' - 1)}$$

Das JCAPL-Modell lässt sich durch $M' = P = P' = 1$ und $P = P' = 1$ für die komplexe Dichte $\tilde{\rho}(\omega)$ beziehungsweise den Kompressionsmodul $\tilde{K}(\omega)$ in das JCA- oder das JCAL-Modell überführen [119].

Der Verlauf des Schalldrucks lässt sich anhand der Helmholtz-Gleichung beschreiben: $\Delta p + k^2 p = 0$.

Mit der Schallgeschwindigkeit $c_0 = \sqrt{\frac{\tilde{K}(\omega)}{\tilde{\rho}(\omega)}}$ und der Wellenzahl $k = \frac{\omega}{c_{\text{Fluid}}}$ folgt $\Delta p \pm \omega^2 \frac{\tilde{\rho}(\omega)}{\tilde{K}(\omega)} p = 0$.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Messsystem zur Bestimmung des Schallabsorptionsgrades nach DIN EN ISO 10534-1	12
Abbildung 2: Schalldruck von einfallender (rot), reflektierter (blau) und resultierender Welle (schwarz) bei Reflexion an einer schallharten Wand.....	12
Abbildung 3: Messaufbau zur Bestimmung des Schallabsorptionsgrades nach DIN EN ISO 10534-2 [6]	13
Abbildung 4: zweidimensionale Schallausbreitung zwischen zwei reflektierenden Platten (schematisch)	16
Abbildung 5: Kundt'sches Rohr mit rechteckigem Querschnitt (schematisch)	19
Abbildung 6: Kundt'sches Rohr am Fachgebiet SAM, Bild: Fraunhofer LBF	21
Abbildung 7: Berechnungsergebnisse verschiedener Materialmodelle für den Absorptionsgrad und berechneter Absorptionsgrad aus Messungen von Proben mit 40 mm Probendicke, gefertigt extern mit dem WSS-Verfahren.....	40
Abbildung 8: Berechnungsergebnisse verschiedener Materialmodelle für den Absorptionsgrad und berechneter Absorptionsgrad aus Messungen von Proben mit 50 mm Probendicke, gefertigt extern mit dem WSS-Verfahren.....	41
Abbildung 9: Verlauf der Absorptionsgrades bei Erhöhung der Materialdicke um 10 % in verschiedenen Materialmodellen im Vergleich zu Ergebnissen aus Messungen bei der ursprünglichen Materialdicke von 40 mm	42
Abbildung 10: Ursache-Wirkungsdiagramm zur Darstellung der Faktoren mit maßgeblichem Einfluss auf den berechneten Schallabsorptionsgrad	44
Abbildung 11: Absorptionsgrad über Frequenz mit verschiedenen Mikrofonabständen und den zugehörigen Grenzfrequenzen	47
Abbildung 12: Einfluss der Mikrofontiefe auf den berechneten Absorptionsgrad bei verschiedenen Mikrofonabständen über der Frequenz	48
Abbildung 13: Absorptionsgrad über Frequenz in Abhängigkeit von der Positionierung des Probenhalters	49
Abbildung 14: Absorptionsgrade über Frequenz in Abhängigkeit von der Drehung der Schaumstoffprobe im Probenhalter	50
Abbildung 15: Auswirkungen von Hohlräumen hinter der Probe auf den gemessenen Absorptionsgrad	51
Abbildung 16: verschiedene Schnittflächen durch verschiedene Zuschnittsverfahren (links: Bandsäge, rechts: Wasserstrahl) [Bild: Fraunhofer LBF]	54
Abbildung 17: möglicher ausgeprägter Anschnitt mit Ausprägung einer Überhöhung beim Sägezuschnitt [Bild: Fraunhofer LBF]	55
Abbildung 18: Auswirkung von verschiedenen Sägeverfahren auf den Absorptionsgrad, Probendicke 30 mm	66
Abbildung 19: Auswirkung von verschiedenen Zuschnittsverfahren auf den berechneten Absorptionsgrad, Probendicke 30 mm, Durchmesser 90 mm	67
Abbildung 20: Absorptionsgrad über Frequenz in Abhängigkeit von der fertigen Person, Probendicke 80 mm	70

Abbildung 21: Abhängigkeit des Absorptionsgrades von der Person des Zuschnitts und vom Fertigungsverfahren; hier Person B; Probendicke 30 mm	72
Abbildung 22: Zunahme des Absorptionsgrades bei zunehmender Probendicke über der Frequenz	72
Abbildung 23: Einfluss des Probeneinbaus auf den Absorptionsgrad, Probendicke 30 mm.....	73
Abbildung 24: Abhängigkeit des Absorptionsgrades von der Einbauvariante der Probe; Probendicke 30 mm, Durchmesser 91 mm	74
Abbildung 25: Nachweis der Normalverteilung, Probendicke 80 mm, Zielgröße Mittelwert.....	77
Abbildung 26: Nachweis: Gleichheit der Residuen, Probendicke 80 mm, Zielgröße Mittelwert.....	77
Abbildung 27: grafische Darstellung des TSS-Werts der Haupteinflussfaktoren aus der Varianzanalyse für die Zielgröße α_W nach Versuchsplan 1.....	80
Abbildung 28: Darstellung von Effekten zur Prüfung der praktischen Signifikanz eines Effekts; Versuchsplan 3 (Probenzuschnitte mit einem Durchmesser von 90 mm extern oder von Person A gefertigt); Zielgröße α_W links: Effektplot, rechts: Darstellung als Boxplot.....	84

A Anhang zur Beschreibung des Messsystems

Abbildung A-1: Ergebnis der Messung von der Oberflächenrauigkeit auf der inneren Rohrwandung des Probenhalters	99
---	----

B Anhang zur experimentellen Versuchsauswertung

Abbildung B-1: Änderung des berechneten Schallabsorptionsgrades über der Frequenz durch den wiederholten (zehnmaligen) Einbau der Probe	100
Abbildung B-2: Einfluss einer Ruhezeit von 21 h auf den berechneten Absorptionsgrad, während derer die Probe im Probenhalter montiert blieb (rote Kurve), Darstellung des Absorptionsgrades über der Frequenz zum Zeitpunkt t_1 in blau.....	100
Abbildung B-3: Auswirkung von der Veränderung des Rohrabschlusses (geschlossen/offen) auf das Spektrum der Schallabsorption	101
Abbildung B-4: Auswirkungen des Mikrofontausches auf den berechneten Absorptionsgrad über der Frequenz	101
Abbildung B-5: Einfluss der Drehung einer Probe ohne sichtbaren Anschnitt im Probenhalter in 10°- Schritten um die Rohrlängsachse auf den Absorptionsgrad, Gruppierung der berechneten Absorptionsgrade zur besseren Visualisierung.....	101
Abbildung B-6: Einfluss der Drehung einer Probe mit deutlich sichtbarer lokaler Verkleinerung des Durchmessers im Probenhalter in 10°-Schritten um die Rohrlängsachse auf den Absorptionsgrad, Gruppierung der berechneten Absorptionsgrade zur besseren Visualisierung	102
Abbildung B-7: Einfluss der Montagerichtung auf den berechneten Absorptionsgrad dargestellt anhand von Berechnungen aus Messungen an einer Probe der Dicke 20 mm	102
Abbildung B-8: Absorptionsgrad über Frequenz, berechnet aus Messungen, bei denen die Position des beweglichen Stempels direkt auf die Probendicke eingestellt wurde (blaue Kurve) und die Probe in den Probenhalter eingesetzt wurde oder nochmals von der Probe weggezogen und anschließend erneut an die Probe herangedrückt wurde (grüne Kurve)	102
Abbildung B-9: Rundmesser zur Einspannung in die Ständerbohrmaschine für den Probenzuschnitt	103

Abbildung B-10: Nichtrechtwinkligkeit und Anschnittskerbe einer Probe (Fertigung: Wasserstrahlzuschnitt mit Abrasivmittel) [Bild: Fraunhofer LBF]	103
Abbildung B-11: Probenhalterung zur Fertigung von Rundproben an der Bandsäge.....	103
Abbildung B-12: Einfluss des Zuschnittsverfahrens (hier: Sägeverfahren) auf den Absorptionsgrad bei verschiedenen Probendicken: a) 30 mm; b) 40 mm; c) 50 mm; d) 80 mm	105
Abbildung B-13: Einfluss des Zuschnittsverfahrens auf den Absorptionsgrad bei der Probendicke 30 mm für verschiedene Durchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm.....	106
Abbildung B-14: Einfluss des Zuschnittsverfahrens auf den Absorptionsgrad bei der Probendicke 40 mm für verschiedene Durchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm.....	107
Abbildung B-15: Einfluss des Zuschnittsverfahrens auf den Absorptionsgrad bei der Probendicke 50 mm für verschiedene Durchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm.....	108
Abbildung B-16: Einfluss des Zuschnittsverfahrens auf den Absorptionsgrad bei der Probendicke 80 mm für verschiedene Durchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm.....	109
Abbildung B-17: Absorptionsgrad über der Frequenz in Abhängigkeit von der Person, die die Proben fertigt, für verschiedene Probendicke: a) 30 mm; b) 80 mm.....	110
Abbildung B-18: gemittelter Absorptionsgrad über der Frequenz in Abhängigkeit von der Person des Zuschnitts für die Probendicke 30 mm und verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm.....	111
Abbildung B-19: gemittelter Absorptionsgrad über der Frequenz in Abhängigkeit von der Person des Zuschnitts für die Probendicke 40 mm und verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm.....	112
Abbildung B-20: gemittelter Absorptionsgrad über der Frequenz in Abhängigkeit von der Person des Zuschnitts für die Probendicke 50 mm und verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm.....	113
Abbildung B-21: gemittelter Absorptionsgrad über der Frequenz in Abhängigkeit von der Person des Zuschnitts für die Probendicke 50 mm und verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm.....	114
Abbildung B-22: Einfluss des Zuschnittsverfahrens beim Zuschnitt durch Person 1 auf das Spektrum des Absorptionsgrades bei den verschiedenen Probendicken: a) 30 mm; b) 40 mm; c) 50 mm; d) 80 mm.....	116
Abbildung B-23: Einfluss des Zuschnittsverfahrens beim Zuschnitt durch Person B auf das Spektrum des Absorptionsgrades bei den verschiedenen Probendicken : a) 30 mm; b) 40 mm; c) 50 mm; d) 80 mm.....	118
Abbildung B-24: Einfluss des Zuschnittsverfahrens beim Zuschnitt durch Person C auf das Spektrum des Absorptionsgrades bei den verschiedenen Probendicken: a) 30 mm; b) 40 mm; c) 50 mm; d) 80 mm.....	120
Abbildung B-25: Abhängigkeit des Absorptionsgrades von der Probendicke und dem Durchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm.....	121
Abbildung B-26: Einfluss verschiedener Einbaumöglichkeiten auf den Absorptionsgrad dargestellt für 4 Probendicken: a) 30 mm; b) 40 mm; c) 50 mm; d) 80 mm.....	123
Abbildung B-27: Auswirkung verschiedener Einbaumöglichkeiten der Probe in den Probenhalter auf den Absorptionsgrad bei der Probendicke 30 mm für verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm.....	124

Abbildung B-28: Auswirkung verschiedener Einbaumöglichkeiten der Probe in den Probenhalter auf den Absorptionsgrad bei der Probendicke 40 mm für verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm.....	125
Abbildung B-29: Auswirkung verschiedener Einbaumöglichkeiten der Probe in den Probenhalter auf den Absorptionsgrad bei der Probendicke 50 mm für verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm.....	126
Abbildung B-30: Auswirkung verschiedener Einbaumöglichkeiten der Probe in den Probenhalter auf den Absorptionsgrad bei der Probendicke 80 mm für verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm.....	127
Abbildung B-31: Abhängigkeit des Absorptionsgrades von der Einbaurichtung, dem Probendurchmesser und dem Zuschnitt, 30 mm Material, a) HZD; b) SLF; c) SLH; d) SSF; e) SSH; f) WSS	129
Abbildung B-32: Absorptionsgrad über Frequenz für 30 mm dicke Proben, gefertigt von Person 1 an der Bandsäge (alle Sägeverfahren) in Abhängigkeit von der Probennummer zum Nachweis eines Lerneffekts beim Zuschnitt für verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm.....	130
Abbildung B-33: Absorptionsgrad über Frequenz für 40 mm dicke Proben, gefertigt von Person 1 an der Bandsäge (alle Sägeverfahren) in Abhängigkeit von der Probennummer zum Nachweis eines Lerneffekts beim Zuschnitt für verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm.....	131
Abbildung B-34: Absorptionsgrad über Frequenz für 50 mm dicke Proben, gefertigt von Person 1 an der Bandsäge (alle Sägeverfahren) in Abhängigkeit von der Probennummer zum Nachweis eines Lerneffekts beim Zuschnitt für verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm.....	132
Abbildung B-35: Absorptionsgrad über Frequenz für 80 mm dicke Proben, gefertigt von Person 1 an der Bandsäge (alle Sägeverfahren) in Abhängigkeit von der Probennummer zum Nachweis eines Lerneffekts beim Zuschnitt für verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm.....	133
Abbildung B-36: Absorptionsgrad über Frequenz für 30 mm dicke Proben, gefertigt von Person B an der Bandsäge (alle Sägeverfahren) in Abhängigkeit von der Probennummer zum Nachweis eines Lerneffekts beim Zuschnitt für verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm.....	134
Abbildung B-37: Absorptionsgrad über Frequenz für 40 mm dicke Proben, gefertigt von Person B an der Bandsäge (alle Sägeverfahren) in Abhängigkeit von der Probennummer zum Nachweis eines Lerneffekts beim Zuschnitt für verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm.....	135
Abbildung B-38: Absorptionsgrad über Frequenz für 50 mm dicke Proben, gefertigt von Person B an der Bandsäge (alle Sägeverfahren) in Abhängigkeit von der Probennummer zum Nachweis eines Lerneffekts beim Zuschnitt für verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm.....	136
Abbildung B-39: Absorptionsgrad über Frequenz für 80 mm dicke Proben, gefertigt von Person B an der Bandsäge (alle Sägeverfahren) in Abhängigkeit von der Probennummer zum Nachweis eines Lerneffekts beim Zuschnitt für verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm.....	137
Abbildung B-40: Absorptionsgrad über Frequenz für 30 mm dicke Proben, gefertigt von Person C an der Bandsäge (alle Sägeverfahren) in Abhängigkeit von der Probennummer zum Nachweis eines Lerneffekts beim Zuschnitt für verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm.....	138

Abbildung B-41: Absorptionsgrad über Frequenz für 40 mm dicke Proben, gefertigt von Person C an der Bandsäge (alle Sägeverfahren) in Abhängigkeit von der Probennummer zum Nachweis eines Lerneffekts beim Zuschnitt für verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm.....	139
Abbildung B-42: Absorptionsgrad über Frequenz für 50 mm dicke Proben, gefertigt von Person C an der Bandsäge (alle Sägeverfahren) in Abhängigkeit von der Probennummer zum Nachweis eines Lerneffekts beim Zuschnitt für verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm.....	140
Abbildung B-43: Absorptionsgrad über Frequenz für 80 mm dicke Proben, gefertigt von Person C an der Bandsäge (alle Sägeverfahren) in Abhängigkeit von der Probennummer zum Nachweis eines Lerneffekts beim Zuschnitt für verschiedene Probendurchmesser: a) 89 mm; b) 90 mm; c) 91 mm.....	141
Abbildung B-44: Absorptionsgrad über Frequenz, bestimmt am FG SAM (grün), mit einer Probe des Durchmessers 90 mm und an einem vergleichbaren Messsystem bei einem externen Partner (gelb) mit einer Probe entsprechend dem Durchmesser des Messsystems von 100 mm, Probendicke 40 mm; jeweils 36 Messwiederholungen, wobei die Proben jeweils um 10° gedreht um die Rohrlängsachse in den Probenhalter eingesetzt wurden	142

C Anhang zur statistischen Versuchsauswertung

Abbildung C-1: Schmalbandspektrum und Terzspektrum des Absorptionsgrades (aus [112])	143
Abbildung C-2: Schmalbandspektrum und Oktavspektrum des Absorptionsgrades (aus [112])	143
Abbildung C-3: Nachweis: Gleichheit der Residuen (links) und Nachweis der Normalverteilung (rechts) der Zielgröße; Probendicke 80 mm, Zielgröße α_w	144
Abbildung C-4: Darstellung von Effekten zur Prüfung der praktischen Signifikanz eines Effekts; Versuchsplan 1 (Sägezuschnitte); Zielgröße α_w ; oben: Boxplots; unten Effektplots	151
Abbildung C-5: Darstellung von Effekten zur Prüfung der praktischen Signifikanz eines Effekts; Versuchsplan 1 (Sägezuschnitte); Zielgröße Mittelwert; oben: Boxplots; unten Effektplots ..	152
Abbildung C-6: Darstellung von Effekten zur Prüfung der praktischen Signifikanz eines Effekts; Versuchsplan 2 (Sägezuschnitte, WSS, HZD); Zielgröße α_w ; oben: Boxplots; unten Effektplots	153
Abbildung C-7: Darstellung von Effekten zur Prüfung der praktischen Signifikanz eines Effekts; Versuchsplan 2 (Sägezuschnitte, WSS, HZD); Zielgröße Mittelwert; oben: Boxplots; unten Effektplots	154
Abbildung C-8: Darstellung von Effekten zur Prüfung der praktischen Signifikanz eines Effekts; Versuchsplan 3 (Sägezuschnitte, MES, Probendurchmesser 90 mm); Zielgröße α_w ; oben: Boxplots; unten Effektplots	155
Abbildung C-9: Darstellung von Effekten zur Prüfung der praktischen Signifikanz eines Effekts; Versuchsplan 3 (Sägezuschnitte, MES, Probendurchmesser 90 mm); Zielgröße Mittelwert; oben: Boxplots; unten Effektplots	156
Abbildung C-10: Darstellung von Effekten zur Prüfung der praktischen Signifikanz eines Effekts; Versuchsplan 4 (Sägezuschnitte, Probendicke 30 mm); Zielgröße α_w oben: Boxplots; unten Effektplots	157
Abbildung C-11: Darstellung von Effekten zur Prüfung der praktischen Signifikanz eines Effekts; Versuchsplan 4 (Sägezuschnitte, Probendicke 30 mm); Zielgröße Mittelwert; oben: Boxplots; unten Effektplots	158

Abbildung C-12: Darstellung von Effekten zur Prüfung der praktischen Signifikanz eines Effekts; Versuchsplan 5 (Sägezuschnitte, Probendicke 40 mm); Zielgröße α_w ; oben: Boxplots; unten Effektplots	159
Abbildung C-13: Darstellung von Effekten zur Prüfung der praktischen Signifikanz eines Effekts; Versuchsplan 5 (Sägezuschnitte, Probendicke 40 mm); Zielgröße Mittelwert; oben: Boxplots; unten Effektplots	160
Abbildung C-14: Darstellung von Effekten zur Prüfung der praktischen Signifikanz eines Effekts; Versuchsplan 6 (Sägezuschnitte, Probendicke 50 mm); Zielgröße α_w , oben: Boxplots; unten Effektplots	161
Abbildung C-15: Darstellung von Effekten zur Prüfung der praktischen Signifikanz eines Effekts; Versuchsplan 6 (Sägezuschnitte, Probendicke 50 mm); Zielgröße Mittelwert; oben: Boxplots; unten Effektplots	162
Abbildung C-16: Darstellung von Effekten zur Prüfung der praktischen Signifikanz eines Effekts; Versuchsplan 7 (Sägezuschnitte, Probendicke 80 mm); Zielgröße α_w , oben: Boxplots; unten Effektplots	163
Abbildung C-17: Darstellung von Effekten zur Prüfung der praktischen Signifikanz eines Effekts; Versuchsplan 7 (Sägezuschnitte, Probendicke 80 mm); Zielgröße Mittelwert; oben: Boxplots; unten Effektplots	164

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassung berechneter Grenzfrequenzen vom Kundt'schen Rohr am Fachgebiet SAM in Abhängigkeit von den möglichen Mikrofonpositionen.....	23
Tabelle 2: mögliche Entscheidungen und Fehlertypen des t-Tests	25
Tabelle 3: Materialparameter des verwendeten Schaumstoffes; bestimmt anhand von Materialproben mit einer Probendicke von 40 mm.....	39
Tabelle 4: Zusammenfassung der Möglichkeiten für die Fertigung von Prüflingen	58
Tabelle 5: Faktoren und Faktorstufen für Versuchspläne.....	59
Tabelle 6: Ergebnis der Varianzanalyse für die Zielgröße α_w nach Versuchsplan 1	79
Tabelle 7: Zusammenfassung der Varianzanalysen für die verschiedenen Zielgrößen nach Versuchsplan 1 (alle Sägeproben); Ordnung der Faktoren nach TSS-Wert	81
Tabelle 8: Zusammenfassung der Varianzanalysen für die verschiedenen Zielgrößen nach Versuchsplan 2 (CNC-gefertigte Proben); Ordnung der Faktoren nach TSS-Wert	81
Tabelle 9: Zusammenfassung der Varianzanalysen für die verschiedenen Zielgrößen nach Versuchsplan 3 (Proben mit 90 mm Durchmesser); Ordnung der Faktoren nach TSS-Wert	81
Tabelle 10: Zusammenfassung der Varianzanalysen für die verschiedenen Zielgrößen nach Versuchsplan 4 (nur Sägeverfahren, Probendicke 30 mm); Ordnung der Faktoren nach TSS-Wert	82
Tabelle 11: Zusammenfassung der Varianzanalysen für die verschiedenen Zielgrößen nach Versuchsplan 4 (nur Sägeverfahren, Probendicke 80 mm); Ordnung der Faktoren nach TSS-Wert	82
Tabelle 12: Zusammenfassung der Einflüsse durch die Faktoren auf das Absorptionsgradspektrum und Einzahlwerte.....	89

C Anhang zur statistischen Versuchsauswertung

Tabelle C-1: Ergebnis der Berechnung der Varianzanalyse; Versuchsplan 1; Zielgröße α_w	145
Tabelle C-2: Ergebnis der Berechnung der Varianzanalyse; Versuchsplan 1; Zielgröße Mittelwert.....	146
Tabelle C-3: Ergebnis der Berechnung der Varianzanalyse; Versuchsplan 1; Zielgröße mittlere absolute Abweichung.....	147
Tabelle C-4: Ergebnis der Berechnung der Varianzanalyse; Versuchsplan 1; Zielgröße Varianz ...	148
Tabelle C-5: Ergebnis der Berechnung der Varianzanalyse; Versuchsplan 1; Zielgröße Schiefe....	149
Tabelle C-6: Ergebnis der Berechnung der Varianzanalyse; Versuchsplan 1; Zielgröße Wölbung .	150

Abkürzungsverzeichnis

BEM	boundary element method
CNC	computerized numerical control
DAGA	Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Akustik e.V.
FE	finite Elemente
HZD	Zuschnitt mit Hitzdraht
MES	Zuschnitt mit rotierendem Messer
PU	Polyurethan
REM	Rasterelektronenmikroskop
SAM	Systemzuverlässigkeit, Adaptronik und Maschinenakustik
SLF	Zuschnitt an der Bandsäge bei langsamer Schnittgeschwindigkeit unter Verwendung der Führung
SLH	Zuschnitt an der Bandsäge bei langsamer Schnittgeschwindigkeit ohne Verwendung der Führung
SSF	Zuschnitt an der Bandsäge bei schneller Schnittgeschwindigkeit unter Verwendung der Führung
SSH	Zuschnitt an der Bandsäge bei schneller Schnittgeschwindigkeit ohne Verwendung der Führung
TU	Technische Universität
WSS	Zuschnitt mit Wasserstrahl
USA	Vereinigte Staaten von Amerika

Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben

A_α	-	Fläche unter dem berechneten Absorptionsgrad, entspricht der Summe der Absorptionsgrade im Frequenzbereich
B'	Nm	Biegesteifigkeit
C	°	Einheit der Temperatur, Grad Celsius
E	N/m ²	E-Modul
H_{12}	-	Übertragungsfunktion zwischen den Mikrofonen
J_n	-	Bessel-Funktion der Ordnungen n mit $n = 1, 2, \dots$
K	-	Einheit der Temperatur, Kelvin
$\tilde{K}(\omega)$	N/m ²	Kompressionsmodul
MS	-	Stichprobenvarianz (<i>mean square</i>)
MD	-	mittlere absolute Abweichung (<i>mean deviation</i>)
P_a	W	auftreffende Schallleistung
P_r	W	reflektierte Schallleistung
Pr	-	Prandtl-Zahl
P_d	W	dissipierte Schallleistung
P_0	N/m ²	aktueller Luftdruck des Fluids
Q	-	Gesamtvarianz (TSS)
Q_1	-	Teilvarianz <i>sum of squares between groups</i> (SSB)
Q_2	-	Teilvarianz <i>sum of squares within groups</i> (error)
R_t	µm	Rautiefe
SSB	-	<i>sum of squares between groups</i>
TSS	-	<i>total sum of squares</i> , Gesamtvarianz des Systems
Z_a	Ns/m ³	Wellenwiderstand
Z_1	Ns/m ³	Komplexe Eingangsimpedanz
Z_0	Ns/m ³	Eingangsimpedanz der Luft $Z_0 = 413 \text{ Ns/m}^3$
Z_{DB}	Ns/m ³	Impedanz des Materials nach DELANY und BAZLEY
c_0	m/s	Schallgeschwindigkeit $c_0 = 343 \text{ m/s}$
d		Durchmesser des Rohres / Abstand der Platten in der 2-dimensionalen Betrachtung der Schallausbreitung
f	Hz	Frequenz
f_o	Hz	„Cut-on“-Frequenz
g_{mn}		Verlustfaktor der Moden (m, n)
h	m	Materialdicke
j	-	imaginäre Zahl
k	m ⁻¹	Wellenzahl $k = \frac{\omega}{c}$
k_0'	m ²	thermisch statische Durchlässigkeit (=Permeabilität)
k_x	m ⁻¹	Wellenzahl in x-Richtung
k_y	m ⁻¹	Wellenzahl in y-Richtung

m''	kg/m ²	flächenbezogene Masse
m	-	Laufvariable, Modennummer
n	-	Laufvariable, Modennummer
p	N/m ²	Schalldruck
p_0	N/m ²	Referenzwert Schalldruck
p_{\max}	N/m ²	Schalldruckmaximum im Rohr
p_{\min}	N/m ²	Schalldruckminimum im Rohr
p_1	N/m ²	Schalldruck an Mikrofon 1
p_2	N/m ²	Schalldruck an Mikrofon 2
p_v	N/m ²	Schalldruck einfallende Schallwelle
p_z	N/m ²	Schalldruck reflektierte Schallwelle
r	-	Reflexionsfaktor
s^2	-	Standardabweichung
t	s	Zeit
u	m/s	Schallschnelle
y_1, y_2	-	Stichproben
\bar{y}_1, \bar{y}_2	-	Mittelwerte der Stichproben
μ_1, μ_2	-	Mittelwerte der Grundgesamtheiten

Griechische Buchstaben

Γ_a	-	Ausbreitungskonstante
Λ	μm	viskose charakteristische Länge
Λ'	μm	viskose thermische Länge
Ξ	Ns/m ⁴	Strömungsresistanz
χ	-	Strukturfaktor
Ω	Hz	Frequenzvariable
α	-	Schallabsorptionsgrad, Schallabsorptionskoeffizient
α_w	-	bewerteter Schallabsorptionsgrad
α_s	-	Schallabsorptionsgrad im Terzspektrum
$\alpha_{stat.}$	-	Signifikanzniveau in der Statistik
α_p	-	Schallabsorptionsgrad im Oktavspektrum
α_∞	-	Tortuosität
α_0'	-	thermisch-statische Tortuosität
α_0	-	statisch-viskose Tortuosität
$\tilde{\alpha}(\omega)$	-	Variable im JCAL-Modell
η	-	Verlustfaktor
η_v	-	dynamische Viskosität

κ_{eff}	-	Wärmeleitung
κ	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit
λ	m	Wellenlänge
μ_P	-	Poissonsche Querkontraktionszahl
ν	-	Verlustfaktor
π	-	Kreiszahl
ρ	kg/m ³	Dichte
$\tilde{\rho}(\omega)$	kg/m ³	komplexe Dichte
ρ_0	kg/m ³	Dichte der Luft
σ	Ns/m ⁵	Strömungswiderstand
φ	rad	Phasenwinkel
ϕ	-	Porosität
ω	s ⁻¹	Kreiswellenzahl $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, Kreisfrequenz

Literaturverzeichnis

- [1] W. Schirmer, *Technischer Lärmschutz - Grundlagen und praktische Maßnahmen zum Schutz vor Lärm und Schwingungen von Maschinen*, 2. Auflage. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2006.
- [2] R. Becker und D. Braun, *Kunststoff Handbuch. Bd. 7: Polyurethane*. Akademie Verlag GmbH, 1983.
- [3] C. Zwikker und C. Kosten, *Sound absorption materials*. Elsevier Publishing Company, Inc., New York, 1949.
- [4] DIN 18041:2016-03, „DIN 18041:2016-03 Hörsamkeit in Räumen - Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung“, 2016.
- [5] DIN EN ISO 354:2003-12, „Akustik - Messung der Schallabsorption in Hallräumen (ISO 354:2003); Deutsche Fassung EN ISO 354:2003“, 2003.
- [6] DIN EN ISO 10534-2, „Akustik - Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren - Teil 2: Verfahren mit Übertragungsfunktion (ISO 10534-2:1998); Deutsche Fassung EN ISO 10534-2:2001“, 2001.
- [7] DIN EN ISO 10534-1, „Akustik - Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren - Teil 1: Verfahren mit Stehwellenverhältnis (ISO 10534-1:1996); Deutsche Fassung EN ISO 10534-1:2001“, 2001.
- [8] A. Kundt, „Untersuchungen über die Schallgeschwindigkeit der Luft in Röhren“, *Ann. Phys.*, Bd. 211, Nr. 11, S. 337–372, 1868.
- [9] G. Müller und M. Möser, *Taschenbuch der Technischen Akustik*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2003.
- [10] M. Möser, *Technische Akustik*, 10. Auflage. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2015.
- [11] K. V. Horoshenkov, A. Khan, F.-X. Bécot, L. Jaouen, F. Sgard, F. Pompoli, N. Prodi, P. Bonfiglio, G. Pispola, F. Asdrubali, J. Hübelt, N. Atalla, C. K. Amédin, W. Lauriks, und L. Boeckx, „Reproducibility experiments on measuring acoustical properties of rigid-frame porous media (round-robin tests)“, *J. Acoust. Soc. Am.*, Bd. 122, Nr. 1, S. 345–353, 2007.
- [12] Airbus, „Round Robin Test 2015“.
- [13] A. F. Seybert, „Notes on absorption and impedance measurements“, University of Kentucky, Technischer Bericht, 2008.
- [14] F. Pompoli, P. Bonfiglio, K. V. Horoshenkov, A. Khan, L. Jaouen, F.-X. Bécot, F. Sgard, F. Asdrubali, F. D'Alessandro, J. Hübelt, und others, „How reproducible is the acoustical characterization of porous media?“, *J. Acoust. Soc. Am.*, Bd. 141, Nr. 2, S. 945–955, 2017.
- [15] N. Andersson, „European Round Robin Test for Sound Absorption“, in *39th International Congress on Noise Control Engineering 2010*, Lissabon, Portugal, 2010.
- [16] T. L. Parrot und C. D. Smith, „Random and systematic measurement errors in acoustic impedance as determined by the transmission line method“, NASA, Bericht, 1977.
- [17] D. A. Bies und J. M. Davies, „An investigation of the measurement of transmission loss“, *J. Sound Vib.*, Bd. 53, Nr. 2, S. 203–221, 1977.
- [18] American Society for Testing and Materials International (ASTM), C 384-04, „Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials by Impedance Tube Method“, 2004.
- [19] American Society for Testing and Materials International (ASTM), E 1050-08, „Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using A Tube, Two Microphones and A Digital Frequency Analysis System“, 2008.
- [20] K. Genuit, *Sound-Engineering im Automobilbereich: Methoden zur Messung und Auswertung von Geräuschen und Schwingungen*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2010.
- [21] M. Möser, *Messtechnik der Akustik*, 1. Auflage. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2010.
- [22] B. H. Song, J. S. Bolton, und Y. J. Kang, „Effect of circumferential edge constraint on the acoustical properties of glass fiber materials“, *J. Acoust. Soc. Am.*, Bd. 110, Nr. 6, S. 2902–2916, 2001.

-
- [23] P. M. C. Morse und K. U. Ingard, *Theoretical Acoustics*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, USA, 1968.
- [24] E. Skudrzyk, *Die Grundlagen der Akustik*. Springer Verlag, Wien, 1954.
- [25] J. Bortz, *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*, 6. Auflage. Springer Medizin Verlag, Heidelberg, 2005.
- [26] S.-O. Han, S. Ochs, und E. Slomski-Vetter, „Einführung in die statistische Versuchsplanung“, TU Darmstadt, Fachgebiet Systemzuverlässigkeit, Adaptronik und Maschinenakustik SAM, Vorlesungsskript, 2017.
- [27] K. Siebertz, D. van Bebber, und T. Hochkirchen, *Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE)*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2010.
- [28] W. Gellert, H. Kästner, und S. Neubert, *Lexikon der Mathematik: rund 700 Textabbildungen und Tabellen*. VEB Bibliographisches Institut, 1979.
- [29] F. P. Mechel, *Innere Schallfelder, Strukturen*. S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1995.
- [30] M. A. Biot, „Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range“, *J. Acoust. Soc. Am.*, Bd. 28, Nr. 2, S. 168–178, 1956.
- [31] M. A. Biot, „Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range“, *J. Acoust. Soc. Am.*, Bd. 28, Nr. 2, S. 179–191, 1956.
- [32] M. E. Delany und E. N. Bazley, „Acoustical properties of fibrous absorbent materials“, *Appl. Acoust.*, Bd. 3, Nr. 2, S. 105–116, 1970.
- [33] Y. Miki, „Acoustical properties of porous materials. Modifications of Delany-Bazley models.“, *J. Acoust. Soc. Jpn. E*, Bd. 11, Nr. 1, S. 19–24, 1990.
- [34] D. L. Johnson, J. Koplik, und R. Dashen, „Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media“, *J. Fluid Mech.*, Bd. 176, Nr. 1, S. 379–402, 1987.
- [35] Y. Champoux und J.-F. Allard, „Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media“, *J. Appl. Phys.*, Bd. 70, Nr. 4, S. 1975–1979, 1991.
- [36] D. Lafarge, P. Lemarinier, J. F. Allard, und V. Tarnow, „Dynamic compressibility of air in porous structures at audible frequencies“, *J. Acoust. Soc. Am.*, Bd. 102, Nr. 4, S. 1995–2006, 1997.
- [37] S. R. Pride, F. D. Morgan, und A. F. Gangi, „Drag forces of porous-medium acoustics“, *Phys. Rev. B*, Bd. 47, Nr. 9, S. 4964, 1993.
- [38] A. Seybert, X. Hua, und D. Herrin, „Controlling uncertainty of sound absorption measurements using the impedance tube method“, in *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, Innsbruck, Österreich, 2013, Bd. 247, S. 869–876.
- [39] R. Kruse und S. Sauerzapf, „Reducing the influence of microphone errors on in-situ ground impedance measurements“, *Acta Acust. United Acust.*, Bd. 95, Nr. 1, S. 151–155, 2008.
- [40] J. Krüger und M. Quickert, „Determination of acoustic absorber parameters in impedance tubes“, *Appl. Acoust.*, Bd. 50, Nr. 1, S. 79–89, 1997.
- [41] P. Dickens, J. Smith, und J. Wolfe, „Improved precision in measurements of acoustic impedance spectra using resonance-free calibration loads and controlled error distribution“, *J. Acoust. Soc. Am.*, Bd. 121, Nr. 3, S. 1471–81, 2006.
- [42] R. Lerch, G. Sessler, und D. Wolf, *Technische Akustik: Grundlagen und Anwendungen*, 1. Auflage. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2009.
- [43] M. Terao und H. Sekine, „A correction method of tube attenuation in impedance-tube two-microphone-position method for absorption coefficient“, in *35th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (Internoise 2006)*, Honolulu, Hawaii, 2006.
- [44] J. Prisutova, K. Horoshenkov, J.-P. Groby, und B. Brouard, „A method to determine the acoustic reflection and absorption coefficients of porous media by using modal dispersion in a waveguide“, *J. Acoust. Soc. Am.*, Bd. 136, Nr. 6, S. 2947–2958, 2014.
- [45] Brüel Kjaer GmbH, „Handbook Brüel & Kjaer Impedance tube kit Type 4206“, Handbuch.
- [46] Sinus Messtechnik, „Manual Sinus Messtechnik AcoustiTube, AFD1001.1“, Handbuch.
- [47] C. W. Kosten und J. H. Janssen, „Acoustic properties of flexible and porous materials“, *Acta Acust. United Acust.*, Bd. 7, Nr. 6, S. 372–378, 1957.

-
- [48] J. S. Bolton, „The Influence of Boundary Conditions and Constraints on the Performance of Noise Control Materials“, in *Proceedings of the Acoustics 2012 Nantes Conference*, Nantes, Frankreich, 2012.
 - [49] B. H. Song und J. S. Bolton, „Investigation of the vibrational modes of edge-constrained fibrous samples placed in a standing wave tube“, *J. Acoust. Soc. Am.*, Bd. 113, Nr. 4, S. 1833–1849, 2003.
 - [50] H.-S. Tsay und F.-H. Yeh, „The influence of circumferential edge constraint on the acoustical properties of open-cell polyurethane foam samples“, *J. Acoust. Soc. Am.*, Bd. 119, Nr. 5, S. 2804–2814, 2006.
 - [51] N. Kino und T. Ueno, „Investigation of sample size effects in impedance tube measurements“, *Appl. Acoust.*, Bd. 68, Nr. 11/12, S. 1485–1493, 2006.
 - [52] N. Kino, G. Nakano, und Y. Suzuki, „Non-acoustical and acoustical properties of reticulated and partially reticulated polyurethane foams“, *Appl. Acoust.*, Bd. 73, Nr. 2, S. 95–108, 2012.
 - [53] D. Pilon, R. Panneton, und F. Sgard, „Behavioral criterion quantifying the edge-constrained effects on foams in the standing wave tube“, *J. Acoust. Soc. Am.*, Bd. 114, Nr. 4, S. 1980–1987, 2003.
 - [54] D. Pilon, R. Panneton, und F. Sgard, „Behavioral criterion quantifying the effects of circumferential air gaps on porous materials in the standing wave tube“, *J. Acoust. Soc. Am.*, Bd. 116, Nr. 1, S. 344–356, 2004.
 - [55] T. E. Vigran, L. Kelders, W. Lauriks, P. Leclaire, und T. Johansen, „Prediction and measurements of the influence of boundary conditions in a standing wave tube“, *Acta Acust. United Acust.*, Bd. 83, Nr. 3, S. 419–423, 1997.
 - [56] Y. Atalla und R. Panneton, „Inverse acoustical characterization of open cell porous media using impedance tube measurements“, *Can. Acoust.*, Bd. 33, Nr. 1, S. 11–24, 2005.
 - [57] J. Allard und N. Atalla, *Propagation of sound in porous media: modelling sound absorbing materials*, 2. Auflage. John Wiley & Sons, West Sussex, UK, 2009.
 - [58] J. Bolton, „Bolton, J. Stuart. "The Influence of Boundary Conditions and Constraints on the Performance of Noise Control Treatments: Foams to Metamaterials“, in *Conference on Recent Advances in Structural Dynamics (RASD) 2013*, Pisa, Italien, 2013.
 - [59] B. Castagnede, A. Aknine, B. Brouard, und V. Tarnow, „Effects of compression on the sound absorption of fibrous materials“, *Appl. Acoust.*, Bd. 61, Nr. 2, S. 173–182, 2000.
 - [60] J. Bolton, B. Song, und Y. J. Kang, „Effect of Circumferential Edge Constraint on the Transmission Loss of Glass Fibre Materials“, in *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, Fort Lauderdale, Florida, USA, 1999, Bd. 1999, S. 419–426.
 - [61] L. Feng, „Modified impedance tube measurements and energy dissipation inside absorptive materials“, *Appl. Acoust.*, Bd. 74, Nr. 12, S. 1480–1485, 2013.
 - [62] A. R. Barnard und M. D. Rao, „Measurement of sound transmission loss using a modified four microphone impedance tube“, in *Noise-Con 2004; Baltimore, Maryland, USA*, 2004.
 - [63] R. Donato, „Model experiments on surface waves“, *J. Acoust. Soc. Am.*, Bd. 63, Nr. 3, S. 700–703, 1978.
 - [64] D. R. Stanley, „Impedance tube specimen preparation and mounting issues“, in *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, New York City, New York, USA, 2012, Bd. 2012, S. 9126–9132.
 - [65] Spectronics Inc., *BEST PRACTICES: A Guide to Making Effective Measurements of Sound Absorption Coefficient*. 2100 Elgin Place; Lexington, KY 40515-1171, 2013.
 - [66] R. Brezny und D. J. Green, „Characterization of edge effects in cellular materials“, *J. Mater. Sci.*, Bd. 25, Nr. 11, S. 4571–4578, 1990.
 - [67] A. Cummings, „Impedance tube measurements on porous media: The effects of air-gaps around the sample“, *J. Sound Vib.*, Bd. 151, Nr. 1, S. 63–75, 1991.
 - [68] Y. J. Kang und J. S. Bolton, „Finite element modeling of isotropic elastic porous materials coupled with acoustical finite elements“, *J. Acoust. Soc. Am.*, Bd. 98, Nr. 1, S. 635–643, 1995.
 - [69] D. Olynyk und T. Northwood, „Comparison of Reverberation-Room and Impedance-Tube Absorption Measurements“, *J. Acoust. Soc. Am.*, Bd. 36, Nr. 11, S. 2171–2174, 1964.

-
- [70] M. McGrory, D. C. Cirac, O. Gaussen, und D. Cabrera, „Sound absorption coefficient measurement: Re-examining the relationship between impedance tube and reverberant room methods“, in *Proceeding of Acoustics*, Fremantle, , Australien, 2012, S. 21–23.
- [71] K. Hirosawa, K. Takashima, H. Nakagawa, M. Kon, A. Yamamoto, und W. Lauriks, „Comparison of three measurement techniques for the normal absorption coefficient of sound absorbing materials in the free field“, *J. Acoust. Soc. Am.*, Bd. 126, Nr. 6, S. 3020–3027, 2009.
- [72] M. Biot, „Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media“, *J. Appl. Phys.*, Bd. 33, Nr. 4, S. 1482–1498, 1962.
- [73] A. Cummings, „Sound attenuation in ducts lined on two opposite walls with porous material, with some applications to splitters“, *J. Sound Vib.*, Bd. 49, Nr. 1, S. 9–35, 1976.
- [74] T. Komatsu, „Improvement of the Delany-Bazley and Miki models for fibrous sound-absorbing materials“, *Acoust. Sci. Technol.*, Bd. 29, S. 121–129, 2007.
- [75] A. Cummings und S. P. Beadle, „Acoustic properties of reticulated plastic foams“, *J. Sound Vib.*, Bd. 175, Nr. 1, S. 115–133, 1994.
- [76] A. Cummings und I.-J. Chang, „Internal mean flow effects on the characteristics of bulk-reacting liners in circular ducts“, *Acta Acust. United Acust.*, Bd. 64, Nr. 4, S. 169–178, 1987.
- [77] I. P. Dunn und W. A. Davern, „Calculation of acoustic impedance of multi-layer absorbers“, *Appl. Acoust.*, Bd. 19, Nr. 5, S. 321–334, 1986.
- [78] Q. Wu, „Empirical relations between acoustical properties and flow resistivity of porous plastic open-cell foam“, *Appl. Acoust.*, Bd. 25, Nr. 3, S. 141–148, 1988.
- [79] F. P. Mechel, „Eine Modelltheorie zum Faserabsorber: Teil 1: Reguläre Faseranordnung“, *Acustica*, Bd. 36, S. 53–89, 1976.
- [80] K. Attenborough, „On the acoustic slow wave in air-filled granular media“, *J. Acoust. Soc. Am.*, Bd. 81, Nr. 1, S. 93–102, 1987.
- [81] K. Attenborough, „Acoustical characteristics of porous materials“, *Phys. Rep.*, Bd. 82, Nr. 3, S. 179–227, 1982.
- [82] J. F. Allard, B. Castagnede, M. Henry, und W. Lauriks, „Evaluation of tortuosity in acoustic porous materials saturated by air“, *Rev. Sci. Instrum.*, Bd. 65, Nr. 3, S. 754–755, 1994.
- [83] J. F. Allard und P. Delage, „Free field measurements of absorption coefficients on square panels of absorbing materials“, *J. Sound Vib.*, Bd. 101, Nr. 2, S. 161–170, 1985.
- [84] J.-F. Allard und Y. Champoux, „New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials“, *J. Acoust. Soc. Am.*, Bd. 91, Nr. 6, S. 3346–3353, 1992.
- [85] N. Kino und T. Ueno, „Improvements to the Johnson-Allard model for rigid-framed fibrous materials“, *Appl. Acoust.*, Bd. 68, Nr. 11–12, S. 1468–1484, 2007.
- [86] X. H. Yang, S. W. Ren, W. B. Wang, X. Liu, F. X. Xin, und T. J. Lu, „A simplistic unit cell model for sound absorption of cellular foams with fully/semi-open cells“, *Compos. Sci. Technol.*, Bd. 118, S. 276–283, 2015.
- [87] O. Doutres, M. Ouisse, N. Atalla, und M. Ichchou, „Impact of the irregular microgeometry of polyurethane foam on the macroscopic acoustic behavior predicted by a unit-cell model“, *J. Acoust. Soc. Am.*, Bd. 136, Nr. 4, S. 1666–1681, 2014.
- [88] O. Doutres, N. Atalla, und K. Dong, „Effect of the microstructure closed pore content on the acoustic behavior of polyurethane foams“, *J. Appl. Phys.*, Bd. 110, Nr. 6, S. 064901, 2011.
- [89] O. Doutres, N. Atalla, und K. Dong, „A semi-phenomenological model to predict the acoustic behavior of fully and partially reticulated polyurethane foams“, *J. Appl. Phys.*, Bd. 113, Nr. 5, 2013.
- [90] J. G. Gwon, S. K. Kim, und J. H. Kim, „Sound absorption behavior of flexible polyurethane foams with distinct cellular structures“, *Mater. Des.*, Bd. 89, S. 448–454, 2016.
- [91] L. J. Gibson und M. F. Ashby, *Cellular solids: structure and properties*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1999.
- [92] C. Perrot, R. Panneton, und X. Olny, „Periodic unit cell reconstruction of porous media: Application to open-cell aluminum foams“, *J. Appl. Phys.*, Bd. 101, Nr. 11, S. 113538, 2007.

-
- [93] M. T. Hoang, G. Bonnet, und C. Perrot, „Multi-scale acoustics of partially open cell poroelastic foams“, in *Proceedings of Meetings on Acoustics ICA 2013*, Montreal, Canada, 2013, Bd. 19.
- [94] P. Leclaire, „Characterization of porous absorbent materials“, in *Proceedings of the Acoustics 2012 Nantes Conference*, Nantes, Frankreich, 2012.
- [95] M. R. F. Kidner und C. H. Hansen, „A comparison and review of theories of the acoustics of porous materials“, *Int. J. Acoust. Vib.*, Bd. 13, S. 112–119, 2008.
- [96] D. Oliva und V. Hongisto, „Sound absorption of porous materials - Accuracy of prediction methods“, *Appl. Acoust.*, Bd. 74, Nr. 12, S. 1473–1479, 2013.
- [97] P. Leclaire, L. Kelders, W. Lauriks, M. Melon, N. Brown, und B. Castagnede, „Determination of the viscous and thermal characteristic lengths of plastic foams by ultrasonic measurements in helium and air“, *J. Appl. Phys.*, Bd. 80, Nr. 4, S. 2009–2012, 1996.
- [98] DIN EN 29053:1993-05, „Akustik; Materialien für akustische Anwendungen; Bestimmung des Strömungswiderstandes (ISO 9053:1991); Deutsche Fassung EN 29053:1993“, 1993.
- [99] M. R. Stinson und G. A. Daigle, „Electronic system for the measurement of flow resistance“, *J. Acoust. Soc. Am.*, Bd. 83, Nr. 6, S. 2422–2428, 1988.
- [100] D. L. Johnson, T. Plona, C. Scala, F. Pasierb, und H. Kojima, „Tortuosity and acoustic slow waves“, *Phys. Rev. Lett.*, Bd. 49, Nr. 25, S. 1840, 1982.
- [101] Y. Champoux, M. R. Stinson, und G. A. Daigle, „Air-based system for the measurement of porosity“, *J. Acoust. Soc. Am.*, Bd. 89, Nr. 2, S. 910–916, 1991.
- [102] Y. Atalla und R. Panneton, „Inverse characterization of the geometrical macroscopic parameters of porous materials“, *Can. Acoust.*, Bd. 28, Nr. 3, S. 80–81, 2000.
- [103] P. Bonfiglio und F. Pompoli, „Acoustical properties of polyurethane open cells materials: Experimental investigation and theoretical models“, in *ICSV14, Cairns, Australia*, Cairns, Australien, 2007.
- [104] J. Tran-Van, X. Olny, F. Sgard, und Y. Gervais, „Global inverse methods for determine the acoustical parameters of anisotropic porous materials“, in *Proceedings of 17th International Congress on Acoustics*, Rom, Italien, 2001.
- [105] W.-Y. Jang, A. M. Kraynik, und S. Kyriakides, „On the microstructure of open-cell foams and its effect on elastic properties“, *Int. J. Solids Struct.*, Bd. 45, S. 1845–1875, 2008.
- [106] R. Panneton und X. Olny, „Acoustical determination of the parameters governing viscous dissipation in porous media“, *J. Acoust. Soc. Am.*, Bd. 119, Nr. 4, S. 2027–2040, 2006.
- [107] ISO 18437-5:20011-04, „Mechanische Schwingungen und Stöße - Kennzeichnung der dynamischen mechanischen Eigenschaften von visko-elastischen Materialien - Teil 5: Ermittlung der Poissonschen Querszahl aus einem Vergleich von Messungen und einer Finite-Elemente-Berechnung“, Apr. 2011.
- [108] A. Syska, *Produktionsmanagement: Das A-Z wichtiger Methoden und Konzepte für die Produktion von heute*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2017.
- [109] DIN SPEC 45660-1:2014-05, „Leitfaden zum Umgang mit der Unsicherheit in der Akustik und Schwingungstechnik - Teil 1: Unsicherheit akustischer Kenngrößen“, *Fachbericht*, Mai 2014.
- [110] I. Dietrich, „Planung und Durchführung einer Sensitivitätsanalyse am Kundt’schen Rohr“, Bachelorthesis, TU Darmstadt, Fachgebiet Systemzuverlässigkeit, Adaptronik und Maschinenakustik SAM, 2013.
- [111] DIN EN ISO 11654:2018-05-Entwurf, „Akustik - Schallabsorber - Bewertung von Schallabsorptionsgraden“, 2018.
- [112] S. Wenzel, „Erarbeitung eines Zielwertes aus Messkurven zur Durchführung einer Sensitivitätsanalyse“, Masterthesis, TU Darmstadt, Fachgebiet Systemzuverlässigkeit, Adaptronik und Maschinenakustik SAM, 2017.
- [113] S. Wenzel, A. Grebel, und E. Slomski-Vetter, „Zielgrößenbestimmung zur Durchführung einer Sensitivitätsanalyse bei der Absorptionsgradmessung im Kundt’schen Rohr“, *DAGA 2018 - 44 Jahrestag. Für Akust.*, Bd. Tagungsband, Nr. Paper ID 000237, 2018.
- [114] H. Fuchs und X. Zha, „Einsatz mikro-perforierter Platten als Schallabsorber mit inhärenter Dämpfung“, *Acta Acust. United Acust.*, Bd. 81, Nr. 2, S. 107–116, 1995.

-
- [115] H. V. Fuchs, *Schallabsorber und Schalldämpfer*, 2. Auflage. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2007.
- [116] P. Leistner und X. Zhou, „Transparente, schallabsorbierende Lärmschutzwände“, Forschungsbericht, 2009.
- [117] X. Zhou und R. Heinz, „Vereinfachte Rechenverfahren für einfache und geschichtete Resonanzabsorber“, *Interner Ber. Fraunhofer Inst.*, 1996.
- [118] D.-Y. Maa, „Microperforated panel wideband absorber“, *Noise Control Eng. J.*, Bd. 29, Nr. 13, S. 77–84, 1987.
- [119] *Matelys Research Lab*, 21-Jan-2019. [Online]. Verfügbar unter: <http://apmr.matelys.com/>.

